



Gonçalo Moura Pereira

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

**Avaliação das propriedades mecânicas
e de autorregeneração de misturas
betuminosas com rejuvenescedores
encapsulados**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Doutor Rui Alexandre Lopes Baltazar Micaelo,
Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Doutora Ana Cristina Ferreira de Oliveira Rosado Freire,
Investigadora Auxiliar, Departamento de Transportes,
Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Júri:

Presidente: Professor Doutor Daniel Aelenei

Arguente: Professor Luís Manuel Trindade Quaresma

Vogal: Professor Doutor Rui Alexandre Lopes Baltazar Micaelo



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Maio, 2019

Avaliação das propriedades mecânicas e de autorregeneração de misturas betuminosas com rejuvenescedores encapsulados

Copyright © Gonçalo Moura Pereira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Rui Micaelo, meu orientador, agradeço a oportunidade que me proporcionou para a realização da presente dissertação e suscitar o meu total interesse pelo tema em estudo. Expresso o meu agradecimento por se ter demonstrado sempre disponível e pelo apoio e acompanhamento ao longo da sua realização.

Agradeço à Doutora Ana Cristina Freire, minha Co-Orientadora, que tão bem me acolheu na Unidade de Pavimentos e Materiais para Infraestruturas de Transportes do Departamento de Transportes do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, por toda a disponibilidade sempre demonstrada, pela partilha de conhecimentos e confiança depositada em mim ao longo deste percurso.

Ao Senhor João Costa, técnico da Unidade de Pavimentos e Materiais para Infraestruturas de Transportes do Departamento de Transportes do LNEC, pelo profissionalismo e dedicação que sempre disponibilizou para colaborar ao longo do programa experimental.

Ao Senhor Paulo Marques, técnico do Departamento de Estruturas do LNEC, pela sua colaboração e simpatia aquando do carregamento dos provetes de ensaio do programa experimental.

Quero também expressar o meu agradecimento a todos os elementos da Unidade de Pavimentos e Materiais para Infraestruturas de Transportes do Departamento de Transportes do LNEC por me terem recebido de forma tão acolhedora e pelo bom ambiente de trabalho proporcionado ao longo deste período.

O meu agradecimento às empresas Galp Energia e Alves Ribeiro pelo fornecimento dos materiais utilizados no fabrico das misturas betuminosas.

Um especial agradecimento aos meus pais, pelo apoio, confiança e oportunidades proporcionadas ao longo da minha vida pessoal e académica. À minha irmã, por toda a amizade demonstrada e ajuda na superação das dificuldades que me foram surgindo ao longo da realização da minha tese.

À minha prima Fernanda por todo o carinho e incentivo desde sempre demonstrados.

Aos meus avós que muito contribuíram para a minha formação pessoal. Com eles, aprendi a nunca desistir e a conseguir ultrapassar os obstáculos que nos vão surgindo ao longo da vida.

Aos meus amigos e colegas pelos excelentes momentos de convívio que me têm vindo proporcionar ao longo da minha vida.

Por fim, à minha namorada, Paloma, por todo o amor, dedicação e motivação sempre demonstrados ao longo deste percurso.

Resumo

Nos últimos anos, a preocupação com um pavimento rodoviário com um período de vida útil maior tem sido uma questão cada vez mais premente, atendendo aos exigentes padrões de qualidade e à crescente preocupação na diminuição dos custos de manutenção. Assim, têm surgido diversas técnicas para promoção do autorrejuvenescimento dos pavimentos, sendo que o conceito de aplicação de microcápsulas em misturas betuminosas tem adquirido relevância. Esta técnica permite uma melhor distribuição do rejuvenescedor ao longo do pavimento e o seu efeito ser ativado quando, assim, for necessário.

Na presente dissertação pretendeu-se estudar o efeito da incorporação de microcápsulas com uma estrutura de alginato de cálcio e o óleo de girassol como agente rejuvenescedor, num pavimento rodoviário de mistura betuminosa. Foram produzidos provetes prismáticos com quatro dosagens de cápsulas e ensaiados quanto à resistência à fadiga, mediante um ensaio de flexão em quatro pontos e simulação de envelhecimento em laboratório. Foram também produzidas lajetas de ensaio com as mesmas dosagens e ensaiadas quanto à resistência às deformações permanentes, segundo o Ensaio de simulação de tráfego.

O conjunto de resultados permitiu verificar que a adição de microcápsulas contribuiu para uma diminuição do módulo de rigidez, principalmente em situação de pós envelhecimento e de pós carregamento. Relativamente à resistência à fadiga, as diferenças foram pouco notórias. Por fim, no que diz respeito à resistência às deformações permanentes, após um período de repouso, para ação das cápsulas de rejuvenescimento, foi verificada uma melhoria considerável nos parâmetros de avaliação respeitantes.

Palavras chave:

Rejuvenescedor

Cápsulas

Fadiga

Simulação em pista de laboratório

Abstract

Over the past few years, the concern about a longer-lasting road pavement has been an increasingly pressing issue, meeting the stringent quality standards and the increasing preoccupation about lower maintenance costs. Thus, several techniques have emerged to promote self-rejuvenation of pavements, which, the concept of microcapsules application in asphalt mixture pavements has acquired relevance. This technique allows a better distribution of the rejuvenator along the pavement and its effect is activated when it is required.

In the present dissertation it is intent to study the effect of the incorporation of microcapsules with a calcium alginate structure and sunflower oil as a healing agent, in a road pavement of asphalt mixture. Prismatic test samples were produced with four capsules' dosages and tested for fatigue strength, using a four-point bending test and laboratory ageing simulation. Test sample plates, with the same dosages, were also produced and tested for resistance to permanent deformations according to the Traffic Simulation Test.

The set of results showed that the addition of microcapsules contributed to a decrease in the stiffness modulus, especially in post-ageing and post-loading conditions. Regarding the fatigue resistance, the differences were not very noticeable. Finally, with respect to resistance to permanent deformations, after a resting period, for the action of the rejuvenation capsules, a considerable improvement in the evaluation parameters was verified.

Keywords:

Rejuvenator

Capsules

Fatigue

Wheel-tracking

Índice

Agradecimentos.....	III
Resumo	V
Abstract	VII
Índice de Figuras	XI
Índice de tabelas	XV
1 – Introdução.....	1
1.1 – Enquadramento.....	1
1.2 – Objetivos.....	3
1.3 – Estrutura da dissertação	3
2 – Revisão da literatura	5
2.1 – Comportamento mecânico e desempenho em serviço de misturas betuminosas	5
2.1.1 – Caracterização geral	5
2.2.2 – Caracterização laboratorial da resistência à fadiga	13
2.2 – Misturas betuminosas com incorporação de rejuvenescedores encapsulados.....	18
2.2.1 – Mecanismo de regeneração.....	18
2.2.2 – Encapsulamento de rejuvenescedores	20
2.2.3 – Caracterização mecânica e regeneração	25
3 – Programa experimental	35
3.1 – Introdução.....	35
3.2 – Materiais	37
3.2.1- Betume e agregados.....	37
3.2.2- Cápsulas	38
3.3 – Métodos experimentais	38
3.3.1- Ensaio termogravimétrico	38
3.3.2- Ensaio de compressão mecânica em cápsulas.....	40
3.3.3- Fabrico e compactação da mistura betuminosa	42
3.3.4- Propriedades volumétricas.....	46
3.3.5 – Caracterização da rigidez e da resistência à fadiga	48
3.3.6 – Simulação do envelhecimento em laboratório	54
3.3.7 – Ativação das cápsulas	55
3.3.8 – Ensaio de simulação em pista em laboratório – <i>Wheel tracking test</i>	55
4 – Análise e discussão de resultados.....	59
4.1 – Introdução.....	59

4.2- Propriedades volumétricas dos provetes.....	59
4.3 Efeito do envelhecimento no Módulo de rigidez e no Ângulo de fase	60
4.4 Resistência à fadiga inicial	63
4.5 – Efeito da solicitação das cápsulas e do período de repouso	67
4.5.1- Módulo de rigidez e ângulo de fase	67
4.5.2- Resistência à fadiga	69
4.6 Resistência à deformação permanente	78
5 - Considerações finais e desenvolvimentos futuros	81
Referências bibliográficas	83
Documentos normativos.....	88
Anexos.....	89
Anexo A -Propriedades volumétricas.....	89
Anexo B – Resistência à fadiga	92
Anexo C – Módulo de rigidez nas três fases de análise	94
Módulo de rigidez (MPa).....	94
Ângulo de fase (°)	96

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Efeito da aplicação de carga na camada betuminosa	5
Figura 2.2 - Comportamento reológico de uma mistura betuminosa (Barros, E. (2012))	6
Figura 2.3 - Efeito da quantidade de betume numa mistura betuminosa com uma determinada granulometria (Erkens, S. M. J. G. (2002))	7
Figura 2.4 - Influência da viscosidade do betume no comportamento à deformação permanente (Freire, A. C. (2002))	7
Figura 2.5 - Evolução do endurecimento do betume (Shell (2003))	8
Figura 2.6 - Variação da deformação por cavado de rodeira em função da porosidade (Freire, A. C. (2002))	9
Figura 2.7 - Influência da pressão instalada nos pneus na resistência à fadiga de um pavimento (Owende, P. M. et. al (2001))	10
Figura 2.8 - Influência da velocidade para rodados de base larga (Miranda, H. M. (2010))	11
Figura 2.9 - Influência da velocidade para rodados duplos (Miranda, H. M. (2010))	11
Figura 2.10 - Influência da temperatura no módulo de rigidez de um betão betuminoso (Neves, J. e Correia, A. G. (2006))	12
Figura 2.11 - Critério de rotura à fadiga em ensaios em extensão controlada	15
Figura 2.12 - Curvas características de energia dissipada (DE) em ensaios de fadiga realizados em misturas betuminosas nos distintos modos de carregamento (Shen, S. et. al (2010))	17
Figura 2.13 - Representação da curva de resultados de RDEC ao longo de um ensaio de fadiga (Shen, S. et. al (2010))	18
Figura 2.14 - Esquema do funcionamento da ação regeneradora das microcápsulas (Su, J. F. et al. (2016))	19
Figura 2.15 - Esquema do funcionamento das microcápsulas (Garcia, A. et al. (2011))	21
Figura 2.16 - Mecanismo de produção das microcápsulas por via da coacervação: (a) agente encapsulado em solução; (b) Formação das gotículas de líquido do encapsulante que irão formar a parede; (c) Deposição do agente encapsulante; (d) Formação da parede; (e) Solidificação do agente encapsulante (Suave, J. et. al (2006))	23
Figura 2.17 - Procedimento de avaliação da regeneração natural (Al-Mansoori, T. et. al (2017))	31
 Figura 3.1 - Esquema do procedimento experimental adotado na presente dissertação.....	36

Figura 3.2 - Frações de agregados calcários utilizados nas misturas betuminosas.....	37
Figura 3.3 - Procedimento de produção das microcápsulas Norambuena-Contreras, J. et al. (2018)	38
Figura 3.4 - Ensaio termogravimétrico das microcápsulas	39
Figura 3.5 - Equipamento de análise da resistência à compressão das microcápsulas	40
Figura 3.6 - Microcápsula colocada para ensaio de resistência mecânica.....	41
Figura 3.7 - Ensaio de resistência mecânica das microcápsulas	41
Figura 3.8 - Misturadora utilizada no fabrico das misturas betuminosas	44
Figura 3.9 - Compactador de rolo metálico (modelo CRT-RCMPV da Cooper Technology)	45
Figura 3.10 - Corte mecânico dos provetes e respectivas dimensões	46
Figura 3.11 - Ensaio da baridade	47
Figura 3.12 - Evolução típica da extensão, da tensão e do módulo de rigidez em ensaios de fadiga em extensão controlada e em tensão controlada	49
Figura 3.13 - Configuração do ensaio de quatro pontos.....	50
Figura 3.14 - Equipamento de ensaio de flexão em 4 pontos: (a) Disposição completa do equipamento; (b) Estrutura de carregamento	51
Figura 3.15 - Relação entre a velocidade de circulação do tráfego rodoviário e a frequência (Mollenhauer et al. (2009))	52
Figura 3.16 - Simulação do envelhecimento a longo prazo da mistura betuminosa no LNEC-UPAVMAT	54
Figura 3.17 - Ativação das cápsulas: (a) Prensa hidráulica; (b) Disposição do provete de ensaio	55
Figura 3.18 - Equipamento de ensaio Wheel tracking do LNEC-UPAVMAT	56
Figura 3.19 - Laje antes (a) e após (b) o ensaio de wheel tracking	58
Figura 4.1 - Módulo de rigidez obtido no varrimento de frequências no estado inicial da mistura betuminosas com as diferentes dosagens de microcápsulas aplicadas	61
Figura 4.2 - Ângulo de fase obtido no varrimento de frequências no estado inicial da mistura betuminosas com as diferentes dosagens de microcápsulas aplicadas	61
Figura 4.3 - Módulo de rigidez apresentado no varrimento de frequências na fase de pós envelhecimento da mistura betuminosas com as diferentes dosagens de microcápsulas aplicadas	62

Figura 4.4 - Ângulo de fase apresentado no varrimento de frequências na fase de pós envelhecimento da mistura betuminosas com as diferentes dosagens de microcápsulas aplicadas	63
Figura 4.5 - Evolução do módulo de rigidez (a) e do ângulo de fase (b) relativamente ao ciclo #100 para os as extensões de 200µm, 400µm e 600µm dos provetes sem cápsulas	64
Figura 4.6 - Evolução do módulo de rigidez (a) e do ângulo de fase (b) relativamente ao ciclo #100 para as extensões de 200µm, 400µm e 600µm dos provetes com a dosagem de 0,5%..	64
Figura 4.7 - Evolução do módulo de rigidez (a) e do ângulo de fase (b) relativamente ao ciclo #100 para as extensões de 200µm, 400µm e 600µm dos provetes com a dosagem de 0,75%	64
Figura 4.8 - Evolução do módulo de rigidez (a) e do ângulo de fase (b) relativamente ao ciclo #100 para os as extensões de 200µm, 400µm e 600µm dos provetes com a dosagem de 1%	65
Figura 4.9 - Leis de fadiga do primeiro ensaio para as quatro dosagens de cápsulas.....	65
Figura 4.10 - Curvas PV- Nf para as quatro dosagens de cápsulas no ensaio de fadiga 1	66
Figura 4.11 - Módulo de rigidez apresentado no varrimento de frequências na fase de pós carregamento da mistura betuminosas com as diferentes dosagens de microcápsulas aplicadas	67
Figura 4.12 - Ângulo de fase apresentado no varrimento de frequências na fase de pós carregamento da mistura betuminosas com as diferentes dosagens de microcápsulas aplicadas	68
Figura 4.13 - Leis de fadiga do ensaio pós carregamento e regeneração para as quatro dosagens de cápsulas	69
Figura 4.14 - Comparação das leis de fadiga do primeiro e do segundo ensaio para os provetes sem cápsulas.....	70
Figura 4.15 - Comparação das leis de fadiga do primeiro e do segundo ensaio para os provetes com a dosagem de 0,5%.....	70
Figura 4.16 - Comparação das leis de fadiga do primeiro e do segundo ensaio para os provetes com a dosagem de 0,75%.....	71
Figura 4.17 - Comparação das leis de fadiga do primeiro e do segundo ensaio para os provetes com a dosagem de 1%.....	71
Figura 4.18 - Evolução da energia dissipada no ensaio de fadiga 1 para a extensão de 200µm	73
Figura 4.19 - Evolução da energia dissipada no ensaio de fadiga 2 para a extensão de 200µm	73

Figura 4.20 - Evolução da energia dissipada no ensaio de fadiga 2 para a extensão de 400µm	74
Figura 4.21 - Evolução da energia dissipada no ensaio de fadiga 2 para a extensão de 400µm	74
Figura 4.22 - Evolução da energia dissipada no ensaio de fadiga 1 para a extensão de 600µm	75
Figura 4.23 - Evolução da energia dissipada no ensaio de fadiga 2 para a extensão de 600µm	75
Figura 4.24 - Curvas PV- Nf para as quatro dosagens de cápsulas no ensaio de fadiga pós carregamento e regeneração	76
Figura 4.25 - Curvas PV- Nf para a mistura betuminosa sem cápsulas no ensaio de fadiga pós carregamento e regeneração	76
Figura 4.26 - Curvas PV- Nf para a mistura betuminosa com a dosagem de 0,5% no ensaio de fadiga pós carregamento e regeneração	77
Figura 4.27 - Curvas PV- Nf para a mistura betuminosa com a dosagem de 0,75% no ensaio de fadiga pós carregamento e regeneração	77
Figura 4.28 - Curvas PV- Nf para a mistura betuminosa com a dosagem de 1% no ensaio de fadiga pós carregamento e regeneração	77
Figura 4.29 - Evolução da fase 1 do ensaio <i>Wheel Tracking</i>	78
Figura 4.30 - Evolução das duas fases do ensaio <i>Wheel Tracking</i>	79

Índice de tabelas

Tabela 3.1 - Características das microcápsulas.....	42
Tabela 3.2 - Quantidades utilizadas na produção de provetes para a parte 1 do procedimento experimental	43
Tabela 3.3 - Quantidades utilizadas na produção de provetes para a parte 2 do procedimento experimental	43
Tabela 3.4 - Parâmetros utilizados nos Ensaios de caracterização do módulo de rigidez segundo o ensaio de flexão a quatro pontos	52
Tabela 3.5 - Parâmetros de ensaio dos Ensaios de resistência à fadiga segundo o ensaio de flexão a quatro pontos	53
Tabela 3.6 - Temperaturas de ensaio propostas em Portugal para ensaio Wheel Tracking (Freire, A. C. (2002))	57
Tabela 4.1 - Valores de baridade e porosidade dos provetes prismáticos ensaiados na parte I do procedimento experimental	60
Tabela 4.2 - Valores de baridade e porosidade das lajetas de ensaio utilizadas na parte II do procedimento experimental	60
Tabela 4.3 – Variação do módulo de rigidez com a fase de envelhecimento	62
Tabela 4.4 - Variação do ângulo de fase com a fase de envelhecimento.....	63
Tabela 4.5 - Variação do módulo de rigidez com a fase de carregamento e período de repouso	68
Tabela 4.6 – Variação do ângulo de fase com a fase de carregamento e período de repouso	68
Tabela 4.7 - Comparação da resistência à fadiga do primeiro para o segundo ensaio	70
Tabela 4.8 - Resistência à fadiga para a extensão de 400µm	72
Tabela 4.9 - Resultados da fase 1 do ensaio Wheel Tracking	78
Tabela 4.10 - Resultados da fase 2 do ensaio Wheel Tracking	79

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

Alfabeto grego

ε – Extensão;

σ – Tensão normal;

φ – Ângulo de fase;

η – Coeficiente de viscosidade;

ρ_w – Densidade da água.

Maiúsculas latinas

RDEC – *Ratio of Dissipated Energy Change*);

PV – *Plateau Value*;

EN – *European Norm*;

3PBT – *3 Point bending test*;

4PBT – *4 Point bending test*;

HR – *Healing ratio*;

TGA – *Thermogravimetric Analysis*;

DTG – *Derivative thermogravimetric*;

MBQ – Mistura betuminosa a quente;

LVDT – *Linear Variable Differential Transducer*;

WTS – *Wheel-tracking slope*;

PRD – *Proportional rut depth*.

Abreviaturas de entidades e organizações

ASTM – American Society for Testing and Materials;

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil;

UPAVMAT – Unidade de Pavimentos e Materiais para Infraestruturas de Transporte;

FCT-UNL – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa;

ICTAC - International Confederation of Thermal Analysis and Calorimetry.

1 – Introdução

1.1 – Enquadramento

A rede rodoviária de um país é um indicador de desenvolvimento sócio económico de grande relevância. Durante o século XX, principalmente após a massificação do transporte individual nos anos 50 e 60, assistiu-se a uma forte aposta no transporte rodoviário, fomentando as ligações entre diversas regiões, para o transporte de pessoas e mercadorias com uma maior economia de tempo e de custos de deslocação. A aposta no transporte rodoviário deve ter sempre em conta diversos fatores que justifiquem a construção de uma determinada via, tendo sempre presente uma análise de custo-benefício equilibrada, o próprio custo de construção da estrada, bem como os custos futuros de manutenção. Desta forma, a preocupação com um pavimento durável, tem assumido uma particular relevância, principalmente atendendo às limitações orçamentais e o crescente cuidado com o consumo de recursos naturais que caracterizam os dias de hoje.

O betume asfáltico é o ligante mais utilizado na constituição dos pavimentos rodoviários, promovendo a aglutinação dos constituintes da mistura. O betume é um derivado da destilação fracionada do petróleo bruto, o qual é uma mistura complexa de hidrocarbonetos com massas moleculares diferentes (Branco, F. et al. (2005)). Como características físicas, considera-se que o betume promove boas condições impermeabilizantes aos pavimentos e adesivas aos materiais constituintes das misturas betuminosas. Atualmente, cerca de 95% do betume produzido a nível mundial, é destinado à indústria da pavimentação rodoviária (Su, J. et al. (2013)). Considera-se o betume como um material termoplástico, em que a sua consistência varia bastante com a temperatura, sendo de consistência mole quando aquecido, facilitando a aplicação em obra, e, endurecendo com o arrefecimento do mesmo. O betume pode ser dividido em dois grupos de constituintes, os asfaltenos (componente sólida) e os maltenos (componente líquida), os quais se sub-dividem em saturados, aromáticos e resinas.

O período de vida útil de um pavimento com características betuminosas está dependente das propriedades dos seus constituintes e das condições de serviço, nomeadamente o clima e o tráfego rodoviário a que vai estar sujeito (Su, J. et al. (2013)). Ao longo dos anos, a rigidez da mistura betuminosa aumenta, diminuindo assim a sua flexibilidade. Desta forma, o betume vai-se tornando mais frágil e propenso ao aparecimento de micro fissuras e ao desenvolvimento de fissuras entre os agregados e o betume, já numa fase posterior de envelhecimento (Brandthaver, J. F. et al. (1993)). Este processo de envelhecimento ocorre essencialmente devido à reação de oxidação do betume, a qual se inicia logo no processo de fabrico da mistura betuminosa e se prolonga durante todo o período de utilização do pavimento e à evaporação dos componentes

voláteis, contribuindo assim, para que o rácio entre a componente sólida (asfaltenos) e a líquida (maltenos) vá aumentando ao longo do tempo.

De acordo com Micaelo, R. et al. (2016), as camadas existentes num pavimento rodoviário são projetadas para um período de vida útil de 10 a 30 anos, havendo a necessidade de substituição dos materiais existentes da camada superior a cada 8 anos. Porém, estas obras de manutenção são consumidoras de uma elevada quantidade de combustíveis fósseis e emissão de gases de estufa para o meio ambiente (Blankendaal, T. et al. (2014)). Assim, assume uma particular importância o desenvolvimento de tecnologias que possam ser promotoras de uma construção e manutenção mais sustentáveis economicamente e ambientalmente.

Os pavimentos betuminosos possuem uma capacidade de regeneração natural. Contudo, tal só é possível, em condições de temperatura e de ausência de tráfego por vários dias que permitam que o betume preencha as fissuras. (Garcia, A. et al. (2015)). Dada a elevada morosidade deste processo e o contínuo fluxo de tráfego automóvel, o efeito na extensão da vida útil do pavimento é residual.

Assim, surgiram estudos de investigação com o objetivo de acelerar este processo de regeneração do betume, entre eles, o aquecimento do betume por indução, a adição de polímeros ou de agentes de rejuvenescimento à superfície do pavimento, como óleos com grande percentagem de maltenos, de modo a restituir a componente líquida do betume e assim, reduzindo a sua rigidez. Contudo, este método tem apresentado resultados limitados, dada à dificuldade de impregnação em profundidade no pavimento (Su, J. F. et al. (2016)), não impedindo assim o envelhecimento natural da zona mais profunda dentro da camada de desgaste e a redução do atrito entre o rodado e o pavimento, podendo pôr em causa a segurança da circulação de tráfego rodoviário (Boyer, R. E. (2000)).

De forma a ultrapassar as limitações acima citadas, surgiu o conceito de promoção da regeneração do betume por via de cápsulas, contendo no seu interior um agente de rejuvenescimento. O princípio de funcionamento desta técnica consiste em que, aquando do aparecimento de uma fissura no pavimento, ocorre o rebentamento das cápsulas no seu perímetro e, assim, a consequente libertação do rejuvenescedor do seu interior para o betume. Esta situação contribui para a redução da viscosidade do betume, permitindo que este flua para a fissura por acção capilar, fechando-a, recuperando assim as suas propriedades mecânicas.

O presente documento pretende abordar o efeito da aplicação de cápsulas com um agente de rejuvenescimento no seu interior durante a produção da mistura betuminosa. As cápsulas são constituídas por alginato de cálcio e o rejuvenescedor é o óleo de girassol, dada a sua elevada afinidade química com o betume (Asli, H. et al. (2012)).

1.2 – Objetivos

O objetivo deste trabalho é a avaliação do efeito regenerador da integração de cápsulas de alginato de cálcio contendo óleo de girassol em misturas betuminosas utilizadas para pavimentos rodoviários betuminosos, mediante a realização de ensaios cíclicos de fadiga e ensaios de avaliação da deformação permanente, de modo a simular as condições reais da passagem de tráfego rodoviário.

1.3 – Estrutura da dissertação

O presente documento está dividido em cinco capítulos.

No Capítulo 1 é feito um enquadramento do tema em análise e a apresentação dos seus objetivos e a organização do mesmo.

No Capítulo 2 é feita uma revisão da literatura sobre o fenómeno da autorregeneração em pavimentos de misturas betuminosas com incorporação de agentes de rejuvenescimento encapsulados, métodos de avaliação e fatores de influência na resistência mecânica em pavimentos de misturas betuminosas.

No Capítulo 3 apresenta-se uma descrição do procedimento experimental implementado, indicando-se os materiais e os equipamentos utilizados e as condições de realização dos ensaios.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios decorridos no procedimento experimental e avaliação da capacidade de autorregeneração da mistura betuminosa com a incorporação do agente encapsulado em estudo.

No Capítulo 5 focam-se as considerações finais relativas ao estudo desenvolvido e sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros, relacionados com o tema em causa.

Por fim, apresentam-se as referências bibliográficas citadas ao longo da presente dissertação.

2 – Revisão da literatura

2.1 – Comportamento mecânico e desempenho em serviço de misturas betuminosas

2.1.1 – Caracterização geral

O fendilhamento é a principal degradação que surge nas camadas superficiais de um pavimento rodoviário, devido à passagem repetida das cargas do tráfego circulante. Apesar de que em cada aplicação do carregamento os níveis das extensões resultantes sejam consideravelmente mais baixos do que aqueles que conduzem à rotura imediata do material, a sucessiva acumulação de extensões irreversíveis leva ao aparecimento de fissuras, as quais habitualmente têm início na base das camadas betuminosas, zona em que existem os maiores esforços de tracção (Figura 2.1), e se propagam no sentido da superfície do pavimento, à medida que vão sendo aplicados os ciclos de carga (Minhoto, M. (2007)).

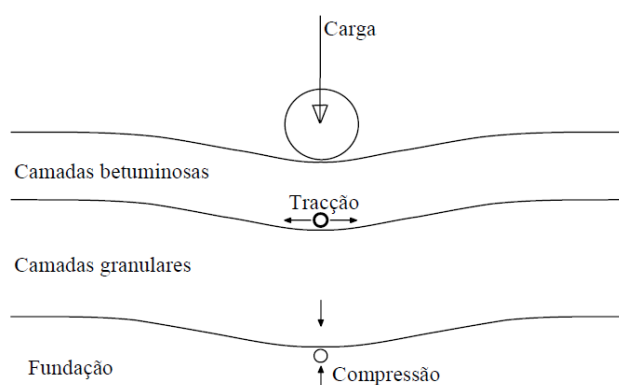


Figura 2.1 - Efeito da aplicação de carga na camada betuminosa

O desempenho à fadiga das misturas betuminosas é dependente de um conjunto alargado de fatores, entre os quais, o comportamento reológico do betume, a ação do tráfego ou a temperatura, em que a sua intrínseca conjugação lhes confere um comportamento viscoelástico característico. Quando a temperatura e o tempo de aplicação da carga são curtos, a mistura betuminosa apresenta um comportamento elástico, tornando-se visco-elástico, à medida que se desenvolve um aumento destes valores (Figura 2.2).

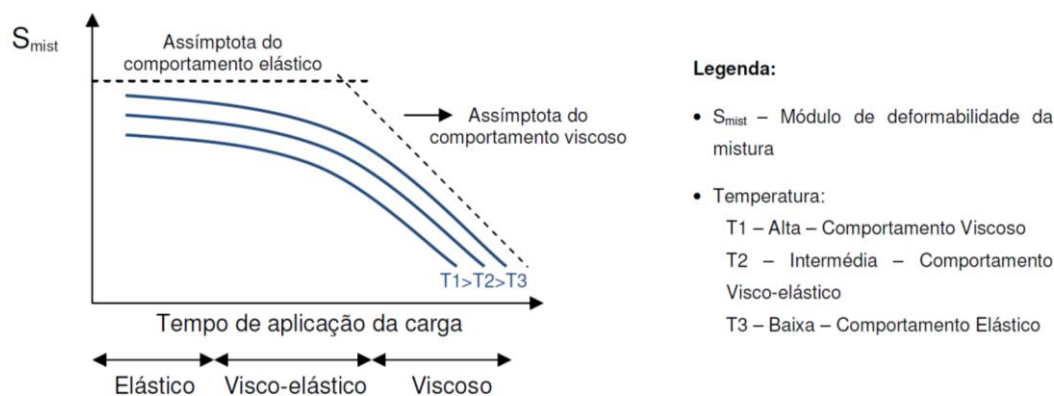


Figura 2.2 - Comportamento reológico de uma mistura betuminosa (Barros, E. (2012))

Os agregados utilizados na mistura são um fator de relevância para a resistência às deformações desenvolvidas ao longo da utilização do pavimento:

A granulometria contínua é uma condição fundamental para que após a compactação, seja obtida uma mistura com um grau de coesão elevado e imbricamento adequado entre as partículas do agregado, promovendo-se assim os contactos entre os agregados.

A máxima dimensão do agregado é uma característica granulométrica que tem influência na medida em que para misturas com valores superiores deste parâmetro, correspondem a uma maior resistência mecânica da mistura (Brown, S. F. e Pell, P. S. (1974)).

A forma dos agregados é também uma das propriedades que tem influência no desempenho das misturas, na medida em que agregados angulosos (obtidos por britagem) apresentam uma maior estabilidade de comportamento da mistura quando solicitada, relativamente aos agregados rolados (de origem aluvionar) (Ugé, P. e Van de Loo, P. J. (1974)).

A textura superficial das partículas dos agregados tem também influência na resistência da mistura pois, superfícies mais rugosas (ex: agregados graníticos) apresentam melhores resultados de resistência do que agregados com a textura superficial lisa (ex: agregados calcários). Tal, é justificado com o facto de que os agregados rugosos promovem uma maior resistência nos contactos das partículas, aumentando a fricção interna e, assim, a resistência às deformações (Masad, E. et. al (2004)).

A quantidade de betume numa mistura betuminosa é também um fator determinante para o seu comportamento ao longo da sua vida útil, pois, para uma determinada granulometria, se não houver betume suficiente, pode ocorrer a desagregação do pavimento, à medida que este vai sendo solicitado pelo tráfego rodoviário. No entanto, caso a quantidade de ligante seja em excesso, a mistura torna-se mais flexível e pode sofrer uma deformação excessiva quando

solicitada, apresentando, portanto, uma reduzida resistência às deformações permanentes. O efeito descrito está representado na Figura 2.3.

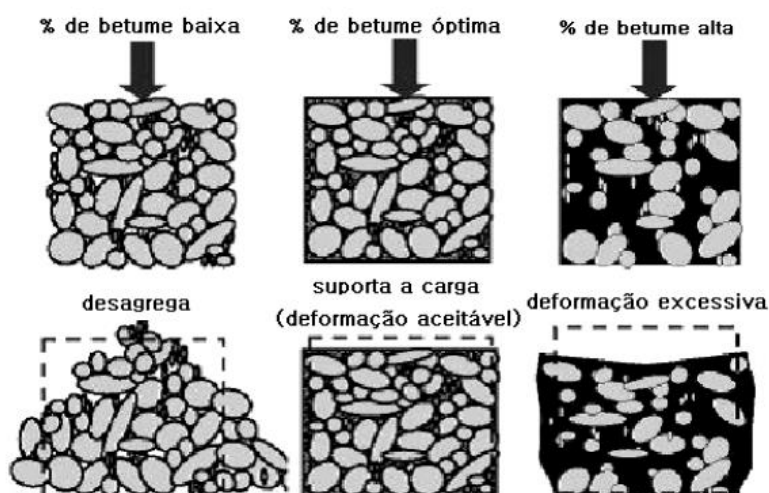


Figura 2.3 - Efeito da quantidade de betume numa mistura betuminosa com uma determinada granulometria (Erkens, S. M. J. G. (2002))

O tipo de betume utilizado também tem influência no comportamento mecânico da mistura betuminosa, na medida em que, betumes com uma menor viscosidade conduzem a uma mistura com uma menor rigidez, portanto, com uma maior suscetibilidade de sofrerem deformações (Figura 2.4). Para climas quentes e pavimentos com camadas betuminosas mais espessas devem ser aplicados betumes mais duros, ou seja, mais viscosos (Freire, A. C. (2002)).

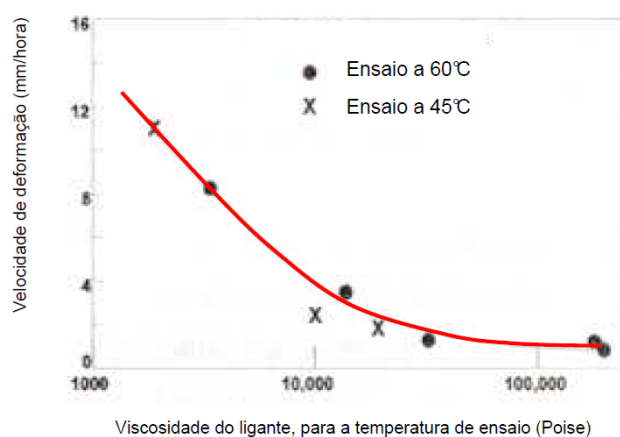


Figura 2.4 - Influência da viscosidade do betume no comportamento à deformação permanente (Freire, A. C. (2002))

O envelhecimento do betume, devido ao seu consequente endurecimento, apesar de prejudicar algumas características das misturas betuminosas, como já foi anteriormente referido, torna-as menos propensas à deformação permanente, devido ao crescente endurecimento da

mistura betuminosa, devido ao aumento da viscosidade do betume ao longo do tempo. O fenómeno da deformação permanente é mais característico do início da vida útil do pavimento, como se pode observar na curva da evolução do endurecimento do betume, a qual relaciona o índice de endurecimento $\frac{\eta_r}{\eta_0}$, definido pela razão entre a viscosidade num determinado momento relativamente à viscosidade inicial ao longo das diferentes fases a que o betume está submetido (Figura 2.5).

O principal fator que influencia o endurecimento do betume é o teor de vazios da mistura betuminosa, devido à promoção do contínuo fluxo de ar. Assim como, o betume que se encontra à superfície no pavimento endurece muito mais rapidamente do que aquele que está localizado mais em profundidade. Tal, é devido à existência de um constante fornecimento de oxigénio, promovendo a sua oxidação; à ocorrência de temperaturas elevadas à superfície do pavimento e, por fim, à ocorrência de foto oxidação do betume pela radiação ultravioleta solar (Shell (2003)).

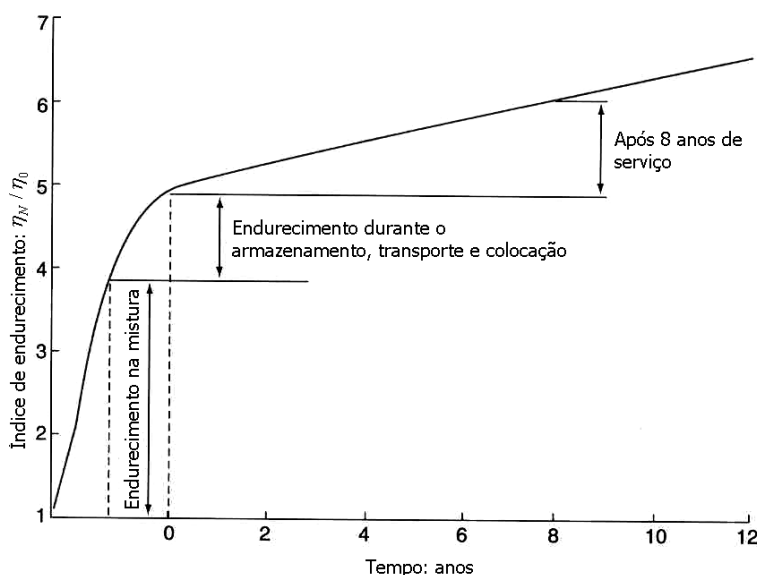


Figura 2.5 - Evolução do endurecimento do betume (Shell (2003))

A compactação é um parâmetro de qualidade a ser exigido às misturas betuminosas, de forma a ser diminuído o seu teor de vazios, para a ocorrência de uma menor deformação aquando da passagem do tráfego rodoviário. Durante a fase de construção de um pavimento, os baixos valores de porosidade podem ser conseguidos, utilizando energias de compactação elevadas, a par de misturas corretamente formuladas.

A percentagem de vazios na mistura, no entanto, não deve ser muito baixa, na medida em que, segundo Freire, A. C. (2002), tal leva a que o espaço entre as partículas de agregado não seja suficiente para permitir o posterior preenchimento por betume, de forma a permitir uma compactação satisfatória. Assim, com base em valores recolhidos em pista de ensaio, foi definido um valor crítico para a porosidade das misturas betuminosas, de cerca de 3%, a partir do qual

se dá um acentuado crescimento do valor da deformação provocado pela passagem dos rodados do tráfego rodoviário (Figura 2.6).

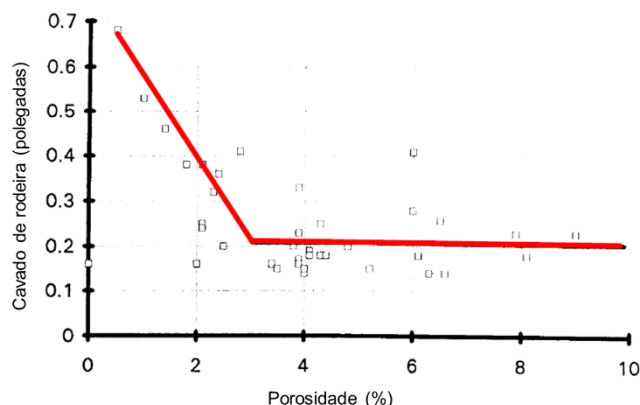


Figura 2.6 - Variação da deformação por cavado de rodeira em função da porosidade (Freire, A. C. (2002))

O próprio método de compactação da mistura tem influência para a análise da sua resposta à ação das cargas do tráfego rodoviário. A aplicação em obra é usualmente feita com o recurso a cilindros. No entanto, em laboratório, existem diversos métodos de compactação dos provetes disponíveis, como a compactação estática, a compactação por impacto, com recurso a um compactador de rolo ou prensa giratória de corte, os quais segundo Khan, Z. A. et. al (1998) foram analisados, podendo atingir valores díspares de resistência à deformação permanente e à fadiga.

Assim, a relevância deste facto é justificada para efeitos de comparação de resultados de misturas betuminosas em laboratório, em que deve ser tido em consideração, o método de compactação dos provetes que foi executado no procedimento experimental para uma análise conclusiva e para que haja uma correspondência com o eventual comportamento em serviço das misturas betuminosas em estudo.

O tráfego a que o pavimento vai estar sujeito durante o seu período de vida de utilização é uma ação gravosa para a resistência mecânica do mesmo. As características mais relevantes dos veículos são o tipo de eixo, o tipo de rodado, a pressão de enchimento dos pneus, a velocidade de circulação dos veículos ou a duração de aplicação das cargas.

O tráfego pesado é, pois, um fator promotor do aumento das deformações no pavimento. O aumento das cargas transportadas, de forma a reduzir ao máximo o custo de transporte de mercadorias, a substituição dos rodados duplos por rodados simples de base larga, assim como o aumento de pressão de enchimento dos pneus contribuem para um aumento das deformações e consequentes custos de manutenção das estradas. Desta forma, o aumento de tráfego de pesados tem sido cada vez mais objeto de análise aquando do dimensionamento da estrutura do pavimento.

A pressão de enchimento dos pneus é frequentemente determinada em função da capacidade máxima de carga transportada, de modo à condução ter uma tração segura ao pavimento e de não ocorrer o sobre aquecimento dos mesmos. Tal facto, leva a que quando o veículo pesado está vazio ou sem estar totalmente carregado ou até a conduzir a baixas velocidades, está com uma pressão instalada nos rodados superior àquela que necessitaria levando a um enfraquecimento acelerado do pavimento. Na Figura 2.7 verifica-se que um veículo com a capacidade de carga vazia e com uma pressão elevada instalada nos rodados (Ponto A) influi um dano por fadiga ao pavimento semelhante ao de um outro veículo totalmente carregado e com a pressão baixa instalada nos pneus (Ponto B). Tal pode ser justificado pelo aumento de tensão no pavimento, dada a área de contacto entre o pneu e o rodado ser mais reduzida na situação dos rodados com a pressão instalada mais elevada.

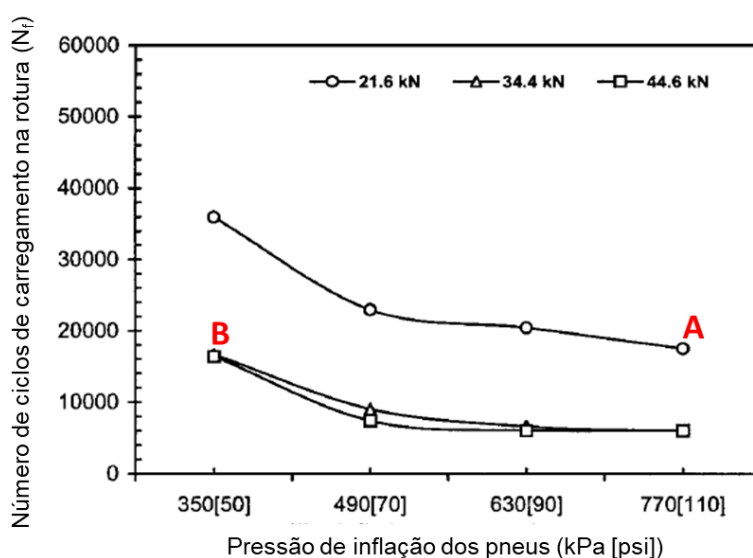


Figura 2.7 - Influência da pressão instalada nos pneus na resistência à fadiga de um pavimento (Owende, P. M. et. al (2001))

Na Figura 2.7 também se pôde verificar que a partir de pressões intermédias, a fadiga provocada pelo tráfego pesado ao longo dos diferentes valores de pressão instalada nos rodados atinge uma assíntota horizontal, a partir do valor intermédio de 490 kPa, o que permite concluir que os efeitos benéficos da redução da pressão dos pneus no dano por fadiga provocado passa a ser residual. Assim, para ser atingido um valor de redução na fadiga significativo ter-se-ia de reduzir a carga transportada para cerca de 50%, o que teria efeitos nocivos na economia do transporte por via rodoviária.

A velocidade de tráfego também tem influência no comportamento das misturas betuminosas à ação das cargas nos pavimentos. As velocidades de tráfego mais reduzidas implicam um maior tempo em que a aplicação da carga dos veículos está a ser atuada no pavimento, levando a que as deformações ao longo do tempo sejam superiores.

Nas Figuras 2.8 e 2.9 é possível verificar a influência da velocidade de circulação do tráfego, nas quais para velocidades mais baixas os valores de deformação consequentes são maiores. É também possível verificar que os eixos dos veículos com rodados simples apresentam valores de deformação superiores comparativamente com os rodados duplos.

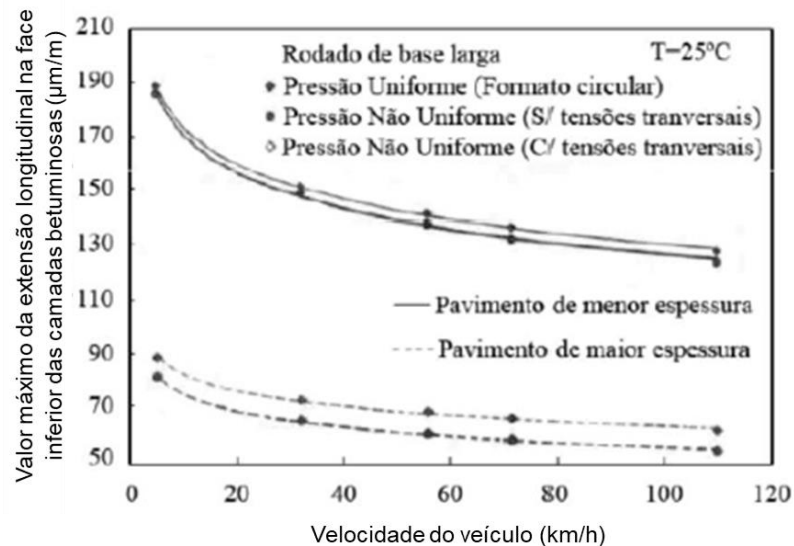


Figura 2.8 - Influência da velocidade para rodados de base larga (Miranda, H. M. (2010))

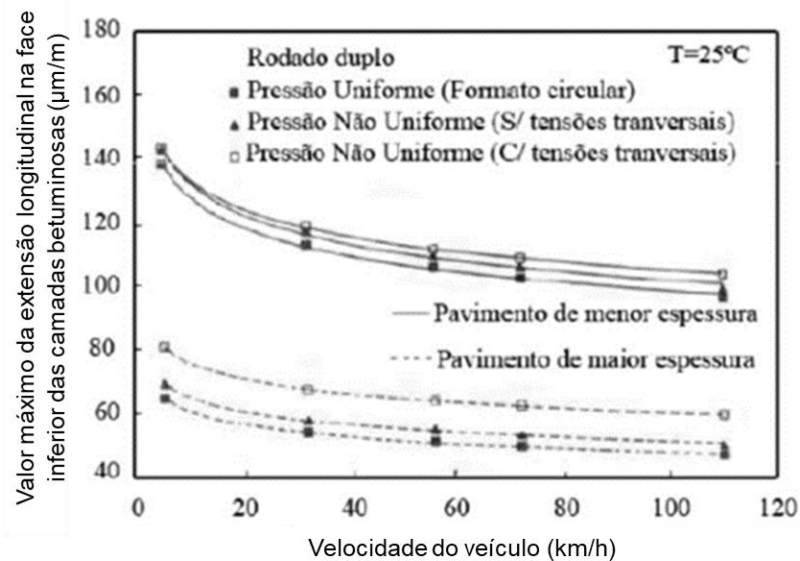


Figura 2.9 - Influência da velocidade para rodados duplos (Miranda, H. M. (2010))

As condições climáticas a que os pavimentos irão estar sujeitos ao longo do período de utilização, nomeadamente a temperatura e a pluviosidade são fatores que devem ser sempre considerados no dimensionamento dos pavimentos rodoviários.

Os danos provocados devido à presença de água nos pavimentos betuminosos ocorrem, devido ao enfraquecimento da coesão entre o betume e os agregados, levando ao aparecimento de fendilhamento ao longo do tempo (Sengoz, B e Agar, E. (2007)).

Além disso, caso as camadas betuminosas estejam já fendilhadas, poderá verificar-se a bombagem de finos das camadas granulares subjacentes, provocando a desagregação da própria mistura betuminosa. Assim, é necessário que aquando da fase de dimensionamento, seja desenvolvido um eficaz sistema de drenagem, de forma a proceder-se ao rápido escoamento das águas que se infiltram na estrutura. O teor de vazios e a permeabilidade da mistura, que podem ser controlados pelo nível de compactação, são relevantes neste aspeto, dado que contribuem para uma melhor drenagem da água que atinja o pavimento. Para misturas betuminosas com elevados valores de teor de vazios, superior a 6%, foi verificado um considerável dano, devido à presença de água. No entanto, para valores entre 15% e 25% verificou-se um reduzido efeito, dada a facilidade de escoamento no pavimento (Stuart, K. D. (1990)).

A temperatura, dado que o betume tem um comportamento reológico dependente desse parâmetro, é um dos fatores que apresenta maior influência na resistência à fadiga do pavimento, pois influencia a viscosidade do betume, condicionando a sua rigidez. O aumento da temperatura conduz a que o betume se torne mais fluido, facilitando a deformabilidade das misturas betuminosas, diminuindo, assim, o seu módulo de rigidez.

Na Figura 2.10 é apresentada a variação do módulo de rigidez, a qual diminui com o aumento da temperatura e com a diminuição da velocidade de circulação dos veículos pesados para um betão betuminoso.

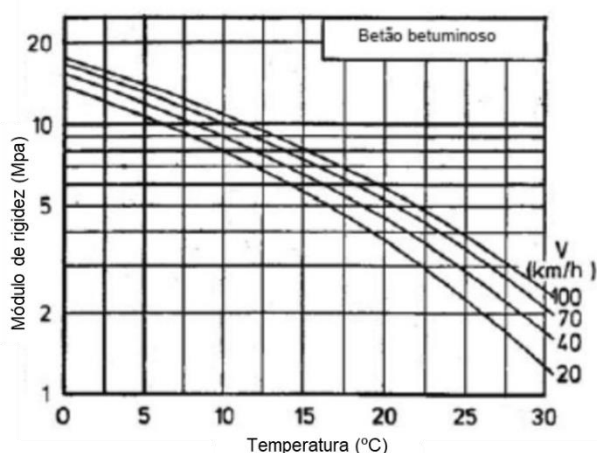


Figura 2.10 - Influência da temperatura no módulo de rigidez de um betão betuminoso (Neves, J. e Correia, A. G. (2006))

Assim, é fundamental que seja realizada a avaliação do comportamento das misturas betuminosas em meio laboratorial, utilizando os valores de temperatura mais representativos das condições a que a mistura irá estar submetida em serviço. Desta forma, para a avaliação do

fendilhamento por fadiga, é usual a escolha de temperaturas baixas ou moderadas, entre os 20°C e os 25°C, dado que é quando as misturas betuminosas apresentam um comportamento visco-elástico com forte componente elástica. Já para o comportamento às deformações permanentes, de acordo com (Freire, A. C. (2002)), é preconizada a adoção de temperaturas relativamente elevadas, na ordem dos 50°C ou 60°C, correspondentes às temperaturas características mais gravosas, durante o período de Verão, tendo por objetivo a redução do tempo de ensaio.

2.2.2 – Caracterização laboratorial da resistência à fadiga

A consideração do fenómeno de fendilhamento no dimensionamento dos pavimentos é feita, tendo em conta o conhecimento da resistência à fadiga através de ensaios mecânicos cíclicos, simulando a passagem dos veículos.

De modo a analisar a resistência à fadiga das misturas betuminosas foram desenvolvidos diversos métodos laboratoriais, os quais, segundo Tangella, S. R. et. al (1990), são: ensaio de flexão simples; ensaio flexão apoiada em meio elástico; ensaio de compressão direta uniaxial; ensaio de compressão diametral; ensaio triaxial; ensaio de fratura; *Wheel tracking test* (ensaio de simulação em pista em laboratório):

Ensaio de flexão simples: Relação entre o comportamento à fadiga e a tensão ou deformação que é aplicada repetidamente à viga de ensaio;

Ensaio de flexão apoiada em meio elástico: Relação entre o comportamento à fadiga e a tensão ou deformação que é aplicada à viga ou lajeta de ensaio com modos de apoio adaptados para a simulação das condições reais *in situ*;

Ensaio de compressão direta uniaxial: Relação entre o comportamento à fadiga e a tensão ou deformação que é aplicada uniaxialmente com cargas repetidas num provete cilíndrico;

Ensaio de compressão diametral: Relação entre o comportamento à fadiga e a tensão ou deformação aplicada em provetes cilíndricos na direção diametral;

Ensaio de compressão triaxial: Relação entre o comportamento à fadiga e a tensão ou deformação é aplicada de forma semelhante ao de compressão uniaxial, mas com confinamento, de forma a aproximar as condições de tensão de ensaio que a mistura betuminosa está sujeita na realidade;

Fratura: Aplicação dos conceitos da mecânica da fratura para previsão da fadiga em diferentes configurações de carregamento;

Wheel Tracking Test: Incluem testes em laboratório com diferentes configurações, bem como à escala real, relacionando-se o número de passagens sucessivas de um rodado e a sua consequente deformação, sob condições de ensaio controladas.

No relatório SHRP-A-404 (1994), foi desenvolvido um estudo comparativo dos diferentes métodos de ensaio acima descritos, no qual o de flexão repetida em provetes prismáticos foi o melhor classificado. Assim, enunciam-se as principais vantagens do ensaio de flexão a 4 pontos para avaliação do comportamento à fadiga segundo Fakhri, M. (1999):

- Pode ser realizado em controlo de força ou de deformação;
- É o melhor tipo de ensaio para interpretação dos resultados em termos de energia dissipada;
- É possível avaliar o teor de vazios, o qual é um fator condicionante para a avaliação do comportamento à fadiga da mistura;
- Capacidade para apresentar resultados fiáveis com um número reduzido de provetes de ensaio.

Assim, tendo em conta o acima enunciado, foi avaliado o comportamento à fadiga dos provetes de ensaio na fase experimental da presente dissertação com base no ensaio de flexão em 4 pontos (4PBT).

A aplicação de carga nos ensaios de fadiga pode ser feita em controlo de força ou controlo de deslocamento. Em controlo de força, esta mantém-se constante e a deformação da viga em teste vai aumentando com o aumento do número de ciclos de carregamento. Já em controlo de extensão, ao longo da aplicação dos ciclos de carga, esta é mantida constante, o que faz com que a força aplicada ao provete, e consequente rigidez do material, vá diminuindo com o desenvolvimento do ensaio. A resistência à fadiga em condições de ensaio sob controlo de força requer tipicamente um menor número de ciclos de carregamento para causar o mesmo nível de dano que os realizados em controlo de extensão, levando a uma menor duração do ensaio. (Shen, S., Carpenter, S. H. (2006)).

Em condições reais, a aplicação de carga num pavimento é complexa e combina diversos modos de carregamento. Assim, é necessário que o método reproduzido em laboratório seja o mais próximo daquele que é realmente desenvolvido ao longo do seu período de vida útil. Tangella, S. R. et. al (1990) sugeriram que em função da dimensão da espessura da camada de mistura betuminosa, fosse utilizado um método de carregamento específico, em que para espessuras relativamente pequenas (inferiores a 51 mm) e apoiadas numa fundação rígida é aconselhável o modo em controlo de extensão, pois a extensão nessa camada é regida pelas inferiores e não pela perda de rigidez da de mistura betuminosa. Para espessuras de camada maiores (superiores a 152 mm), já deverá ser em controlo de força, pois a camada de mistura betuminosa é a que vai estar mais sujeita aos carregamentos infligidos pelo tráfego. Para

espessuras intermédias deverá ser aplicada uma combinação de ambos os modos como proposto por Monismith, C. L. et. al (1977).

Os ensaios de fadiga para um provete em estudo, em função do nível de extensão aplicada, podem requerer um tempo de ensaio em muitos casos superior a um dia, podendo chegar a uma semana. Atendendo a que para a obtenção da lei de fadiga (relação entre o estado de tensão/deformação e o número máximo admissível de aplicações de carga até se verificar um dado critério de falha) que caracteriza uma mistura betuminosa ser necessário a execução de vários ensaios com diferentes níveis de extensão, o tempo de ensaio total para essa mistura pode claramente ultrapassar uma semana. Assim, nos últimos anos têm surgido métodos de análise que reduzam o tempo necessário à caracterização da resistência à fadiga de misturas betuminosas como se analisará de seguida:

Critério tradicional de rotura:

A resistência à fadiga é função do modo de carregamento. Em tensão controlada o critério de rotura é bem definido, uma vez que a mistura apresenta fendas que se desenvolvem até ao colapso completo da amostra. Já nos ensaios em controlo de extensão, pelo facto da rotura não ser visível, foi convencionado que a fadiga da mistura é traduzida em função do seu módulo de rigidez, em que é atingida quando ocorra uma redução do módulo de rigidez no início do ensaio em 50% (Figura 2.11) (Pais, J. C., Palha, C. A. O. F. (2010)).

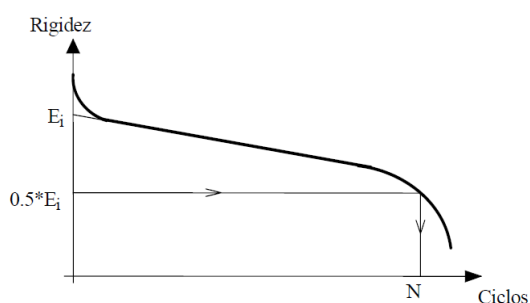


Figura 2.11 - Critério de rotura à fadiga em ensaios em extensão controlada

A resistência à fadiga (N_f) da mistura betuminosa, em função da extensão controlada, pode ser caracterizada pela equação 2.1:

$$N_f = k_1 * \varepsilon_0^{k_2} \quad (2.1)$$

na qual, ε_0 é a extensão de tração e os coeficientes k_1 e k_2 são característicos do material em análise medidos experimentalmente.

Taxa de variação da energia dissipada:

A resistência à fadiga em misturas betuminosas pode também ser avaliada em termos do conceito de energia dissipada, que é devida ao comportamento viscoelástico do material

quando lhe é aplicado um carregamento externo e corresponde à área interior da curva tensão/deformação nos ciclos de carga e descarga. Pode ser calculada pela equação 2.2 (Tayebali, A. A. et. al (1992)):

$$DE_i = \pi * \varepsilon_i * \sigma_i * \sin(\varphi_i) \quad (2.2)$$

em que DE_i é a energia dissipada em cada ciclo de carga i e ε_i , σ_i , φ_i são respetivamente a amplitude da deformação, a amplitude da tensão instalada e o ângulo de fase em cada ciclo de carga i .

A quantidade de energia dissipada gerada por cada ciclo de carga adicional depende da energia dissipada nos ciclos anteriores e vai provocar uma maior extensão do fendilhamento, influenciando assim o dano acumulado.

A energia dissipada acumulada representa o efeito total de dano de fadiga, independentemente do tipo de mistura betuminosa, modo de carga (controlo de tensão ou de deformação) ou temperatura e serve para previsão da falha por fadiga (Tayebali, A. A. et. al (1992); Shen, S., Carpenter, S. H. (2006))

A sua equação é:

$$DE_{NF} = \sum_{i=1}^{NF} \pi * \varepsilon_i * \sigma_i * \sin(\varphi_i) \quad (2.3)$$

A energia dissipada acumulada e o número de ciclos que conduzem à rotura é relacionada pela equação (2.4):

$$DE_{NF} = A * N_f^z \quad (2.4)$$

em que, DE_{NF} é a energia dissipada acumulada;

A , z são coeficientes determinados experimentalmente;

N_f é o número ciclos até atingir a falha.

Conforme, o ensaio de fadiga seja desenvolvido em tensão ou deformação controlada, a equação (2.2), assume a forma das equações (2.5) e (2.6), respetivamente:

$$DE_i = \pi \frac{\sigma^2}{E_i} \sin(\delta_i) \quad (2.5)$$

$$DE_i = \pi \varepsilon^2 E_i \sin(\delta_i) \quad (2.6)$$

em que, DE_i é a energia dissipada no ciclo i ;

σ , ε é a tensão ou deformação controlada;

δ_i é o ângulo de fase no ciclo i ;

E_i é o módulo de deformabilidade.

A evolução da energia dissipada ao longo de um ensaio de fadiga depende do modo de carregamento (tensão ou deformação controlada), sendo, no entanto, possível distinguir três fases distintas em ambos (Figura 2.12).

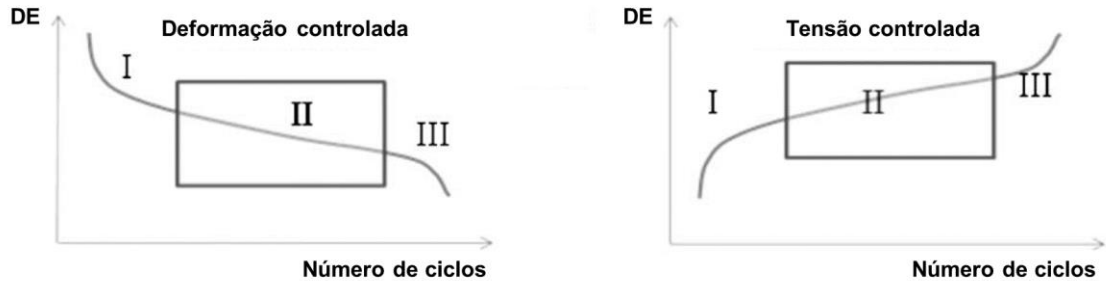


Figura 2.12 - Curvas características de energia dissipada (DE) em ensaios de fadiga realizados em misturas betuminosas nos distintos modos de carregamento (Shen, S. et. al (2010))

Atendendo a que nem toda a energia dissipada contribui para a fadiga das misturas betuminosas, mas somente uma parcela relativa à quantidade de energia dissipada devido a cada ciclo adicional, excluindo-se a energia dissipada através de processos passivos, como a o amortecimento viscoelástico e a energia térmica, foi desenvolvida a teoria da variação da energia dissipada ou *RDEC* (*Ratio of Dissipated Energy Change*) (Shen, S. et. al (2010)).

O grau de variação da energia dissipada pode ser encarado como uma medida da energia que causa um dano incremental entre dois ciclos de carregamento. De acordo com a Figura 2.12, a segunda fase das curvas é a que tem maior interesse para a caracterização da resistência à fadiga da mistura betuminosa, em que ocorre uma variação da energia dissipada de forma constante ao longo da aplicação dos ciclos de carregamento, havendo um crescimento e propagação do dano na mistura.

O parâmetro *RDEC* pode ser calculado, para o modo de carregamento em deformação controlada, de acordo com a equação (2.7):

$$RDEC_b = \frac{DE_a - DE_b}{DE_a * (b - a)} \quad (2.7)$$

em que, *a* e *b* são ciclos de carga consecutivos, sendo $a < b$;

$RDEC_b$ é o grau de variação da energia dissipada no ciclo *b* relativamente ao *a*;

DE_a e DE_b são as energias dissipadas respetivamente aos ciclos *a* e *b*. Geralmente é usual considerar $b - a = 100$ (Shen, S., Carpenter, S. H. (2006)).

Os valores da curva do *RDEC* ao longo dos ciclos de carregamento de um ensaio de fadiga encontram-se representados na Figura 2.13, onde é possível verificar três fases.

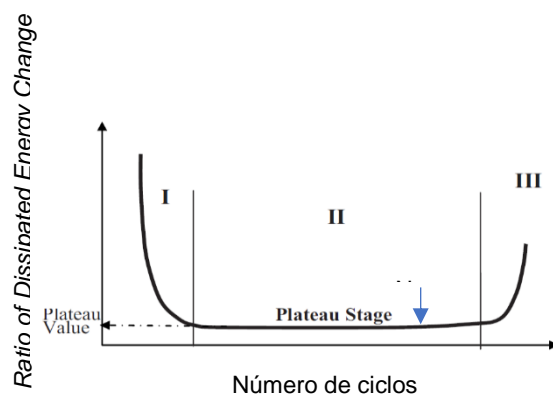


Figura 2.13 - Representação da curva de resultados de RDEC ao longo de um ensaio de fadiga (Shen, S. et. al (2010))

A fase I da curva corresponde à reorientação do material devido à aplicação do carregamento. A fase II indica o período em que a percentagem de energia introduzida está a ser transformada em dano, correspondendo ao parâmetro energético designado como valor de patamar (*PV - Plateau Value*, na língua inglesa), respetivo à rotura do provete de ensaio. Valores baixos do parâmetro *PV* estão associados a materiais resistentes à fadiga ou a uma amplitude de carregamento externo baixa, ou ambos. Valores mais elevados do parâmetro *PV* correspondem a um grande incremento da energia dissipada entre ciclos de carregamento sucessivos e, assim, uma menor resistência à fadiga. Na fase III dá-se o aumento do RDEC, que evidencia a falha por fadiga.

O valor de patamar (*PV*) é o parâmetro utilizado como critério de falha e é definido como o valor de RDEC correspondente a uma redução de 50% do módulo de rigidez, independentemente do tipo de mistura, modo de carregamento, níveis de carga e condições de ensaio (temperatura e frequência), existindo uma relação única entre *PV* e o $N_{f,50}$ numa escala bi-logarítmica (Shen, S. et. al (2010)).

2.2 – Misturas betuminosas com incorporação de rejuvenescedores encapsulados

2.2.1 – Mecanismo de regeneração

O betume asfáltico é dividido em duas fases: uma sólida, constituída por asfaltenos e outra líquida, composta por maltenos. O envelhecimento do betume deve-se essencialmente à reação de oxidação, a qual se inicia logo no processo de fabrico da mistura betuminosa e se prolonga ao longo de todo o período de vida útil do pavimento. Outra razão é a perda dos

componentes voláteis da mistura (Su, J. et al. (2013)). Tal, leva a que o teor de asfaltenos vá aumentando em detrimento do de maltenos, tornando assim a mistura betuminosa cada vez mais rígida e propensa ao aparecimento de microfissuras.

De forma a proceder-se à reposição do teor de maltenos na mistura betuminosa, é possível proceder à aspersão com óleos com elevada proporção de maltenos à superfície do pavimento. Contudo, este método apresenta como limitação, o facto desses óleos somente conseguirem penetrar nos primeiros centímetros de pavimento, poderem causar uma elevada redução do atrito entre as rodas dos veículos e a superfície e uma contaminação do meio ambiente, dada a composição química dos mesmos. (Su, J. F. et al. (2015))

Assim, o conceito de regeneração do betume com base em microcápsulas com agente de regeneração no seu interior é uma técnica que tem sido investigada e pode representar possivelmente, uma alternativa para ultrapassar o problema da dificuldade de penetração no pavimento acima enunciado, dada a sua capacidade de dispersão no betume. A ativação das cápsulas é dada, quando na proximidade destas, ocorre o aparecimento de uma micro fissura no pavimento, partindo-as e, por ação capilar, verifica-se a libertação do óleo do seu interior, diminuindo a viscosidade do betume em volta da fissura e, posteriormente, contribui para o seu fecho. A Figura 2.14 ilustra o mecanismo de regeneração de fissuras.

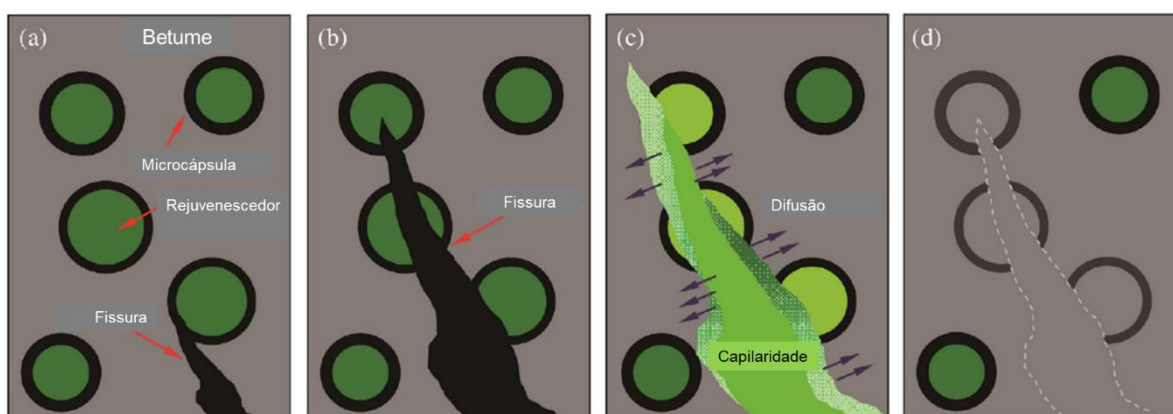


Figura 2.14 - Esquema do funcionamento da ação regeneradora das microcápsulas (Su, J. F. et al. (2016))

De modo a ter um funcionamento adequado, as cápsulas têm de ter uma boa resistência térmica e mecânica para resistir às temperaturas e esforços elevados próprios da fase de fabrico e compactação das misturas betuminosas. Não podem ser biodegradáveis, de forma a terem a capacidade de poder atuar assim que surjam as fissuras no pavimento dentro do seu período de vida útil (Su, J. et al. (2013); Garcia, A. et al. (2015)).

2.2.2 – Encapsulamento de rejuvenescedores

1) Cápsulas obtidas por via de saturação dos poros dos agregados com rejuvenescedor seladas com estrutura de resina epoxy e cimento

Em 2010, (Garcia, A. et al. (2010)) desenvolveram o primeiro método de fabrico de cápsulas, especificamente para utilização em misturas betuminosas, as quais eram caracterizadas por uma resina epoxy e areia como estrutura, de modo a que estas pudessem ser suficientemente resistentes, dadas as elevadas temperaturas da fase de fabrico da mistura betuminosa e os anos de serviço do pavimento até terem de ser ativadas. Este método surgiu na sequência de dois estudos anteriores (Hwang, J. S. et al. (2006); Cosco, S. et al. (2007)), os quais tinham revelado valores de resistência das cápsulas insuficientes para a fase de fabrico das misturas betuminosas.

As cápsulas do estudo de 2010 referido são constituídas pelo óleo regenerador, um óleo bastante denso e com alto teor de aromáticos e uma areia bastante porosa de silicato de cálcio para absorção da componente líquida. A sua estrutura exterior é composta por cimento, material escolhido, dada a sua reduzida porosidade, e, uma resina epoxy.

O processo de fabrico das cápsulas foi:

- i. Peneiração da areia de silicato de cálcio até se obter uma fração entre 1 e 1,7 mm e secagem da areia em estufa a 70°C durante 24 h;
- ii. Colocação num recipiente da areia e do óleo rejuvenescedor por cima com o dobro da altura de areia colocada e aquecimento durante 1 h a 105° C, de forma a reduzir a viscosidade do óleo;
- iii. Colocação do recipiente numa câmara de vácuo, de modo a remover o ar existente e forçar o óleo a penetrar nos grãos de areia;
- iv. Repetição das etapas ii e iii duas vezes;
- v. Retirar o excesso de óleo e agitar a mistura, de modo a proceder à sua homogeneização;
- vi. Para produção da cápsula misturar manualmente a resina epoxy e a areia com o óleo numa proporção 1:2,5;
- vii. Num outro recipiente colocar esferas de aço de 2 cm num rácio de volume 1:54 para o volume total do recipiente e 4 partes de cimento e 1 de areia com o rejuvenescedor e a resina epoxy em massa e misturar manualmente em círculos durante 15s, formando-se assim cápsulas de resina e epoxy à volta de partículas de areia e óleo;
- viii. Peneiração até se obter uma fração entre 1 e 2 mm;
- ix. Cura em estufa a 35°C durante 8h;

- x. Adição de epoxy na proporção 1:20 (1g de resina epoxy por cada 20g de cápsulas);
- xi. Cura das cápsulas durante 8h com um movimento horizontal contínuo de 400 rpm, de modo a evitar a formação de aglomerados.

Neste estudo, Garcia, A. et al. (2010) procederam à análise termogravimétrica e a ensaios de resistência mecânica das cápsulas. A primeira permitiu concluir da capacidade das cápsulas poderem resistir às temperaturas características do processo de fabrico das misturas betuminosas pois, até à temperatura de 180° C, foram apresentadas perdas de massa de cerca de 3%, o que se justificou essencialmente devido à evaporação de humidade existente até aí.

Na análise da resistência mecânica foi apresentado um comportamento elástico das cápsulas e uma maior resistência à tração do que à compressão. As curvas de desenvolvimento do ensaio foram obtidas a uma velocidade muito baixa, de forma a identificar o seu modo de rotura. À medida que ocorre o envelhecimento do betume e o seu consequente aumento de rigidez, a tensão aplicada nas paredes das cápsulas devido à passagem do tráfego rodoviário, vai-se tornando cada vez maior, sendo que, após vários ciclos de carga, a probabilidade de rotura das cápsulas aumenta (Figura 2.15). Uma das vantagens deste método de rejuvenescimento é a possibilidade de definir diferentes limites de rotura das cápsulas, pela variação da espessura da sua estrutura externa, o que permite definir resistências diferentes e consequentes momentos diferentes de rotura para libertação do óleo regenerador.

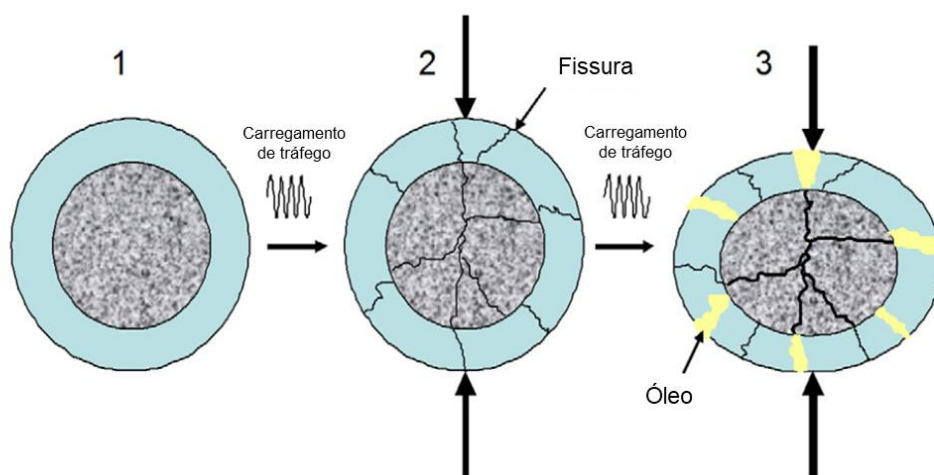


Figura 2.15 - Esquema do funcionamento das microcápsulas (Garcia, A. et al. (2011))

A incorporação das cápsulas em mistura betuminosa foi também analisada e, após serem misturadas durante 15 minutos a 285 rpm a uma temperatura de 160° C, através de um microscópio ótico, foi possível verificar que as cápsulas resistiram à fase do fabrico da mistura com uma considerável quantidade de óleo no seu interior, apesar de algumas se terem quebrado durante o processo, e, uma distribuição uniforme na mistura, o que contribuirá para que o

processo de regeneração ocorra em todo o pavimento, onde e quando necessário e não só à superfície.

Em 2011, (Garcia, A. et al. (2011)) testaram a mesma configuração de cápsulas, no entanto, com quatro tipos de rejuvenescedores diferentes, todos muito densos, com um alto teor de aromáticos e utilizados habitualmente como rejuvenescedores de superfície, no núcleo das cápsulas e concluiu-se que as características das cápsulas são bastante dependentes do tipo de rejuvenescedor utilizado no seu núcleo. Em primeiro lugar, de acordo com o método de encapsulação proposto, a espessura da estrutura externa da cápsula é inversamente proporcional à viscosidade do óleo. Em segundo lugar, também se verificou que o volume de óleo existente no interior das cápsulas aumenta com a viscosidade do óleo. Assim, de forma a maximizar o volume de rejuvenescedor no interior das cápsulas, é aconselhável a escolha de óleos com maior viscosidade.

Relativamente à resistência à compressão, as cápsulas com óleos com menor viscosidade apresentaram valores maiores de resistência. Além disso, a velocidade de ensaio da compressão das cápsulas, também se revelou relevante, pois apresentaram valores menores de resistência à compressão com o aumento da velocidade, o que permitiu concluir que as cápsulas entrariam em rotura, libertando o óleo do seu interior de forma gradual, à medida que iam estando sujeitas às sucessivas cargas do tráfego rodoviário, o qual iria passar repetidamente e, não, a um único carregamento isolado. Neste estudo, também foi possível verificar que as cápsulas resistiram à fase de fabrico da mistura betuminosa. No entanto, verificou-se que, quando aplicadas à mistura, com ou mesmo sem óleo, contribuíram para uma redução dos valores de resistência mecânica e de módulo de rigidez. Tal facto, segundo os autores, é devido, possivelmente, à afinidade entre o agregado e o betume ser mais forte do que a das cápsulas com o betume. Assim, foi proposto que se avaliasse a possibilidade de reforço estrutural com a aplicação de fibras à mistura betuminosa.

2) Produção de cápsulas por coacervação

Em 2012, (Su, J. F., & Schlangen, E. (2012)), desenvolveram um método físico-químico de encapsulamento do agente rejuvenescedor, numa parede de melamina formaldeído. Este estudo surgiu na sequência do estudo anterior de (Garcia et. al 2011), dada a dificuldade do óleo em ser libertado dos poros da areia de silicato de cálcio utilizada no mesmo aquando da rotura das cápsulas, devido à sua estrutura porosa e à elevada viscosidade do óleo.

Na produção de microcápsulas por métodos químicos, os fatores de custo de produção, bem como a sua capacidade e complexidade, têm de ser levados em conta, uma vez que têm o propósito de aplicação na indústria da construção. Além disso, têm de ser respeitadas determinadas exigências, entre as quais, a distribuição e dimensão das cápsulas no pavimento,

a sua estabilidade térmica, não serem biodegradáveis e terem determinados valores mínimos e máximos de resistência mecânica, uma vez que são determinantes para o seu desempenho (Yuan, L. et. al (2006)). Os métodos físico-químicos mais utilizados na preparação de microcápsulas são a coacervação, o encapsulamento Sol-Gel e a microencapsulação assistida por CO₂ supercrítico (Jyothi, N. V. N. et. al (2010)).

As microcápsulas deste estudo foram desenvolvidas segundo o método de coacervação, o qual consiste na suspensão do material encapsulado numa solução que irá formar a cápsula. De forma a aumentar a estabilidade térmica e uma dimensão mais compacta das cápsulas, foi adotada uma coacervação em 2 fases, desenvolvendo assim duas membranas em torno do núcleo das microcápsulas.

O mecanismo geral deste método consiste em três etapas, realizadas sobre agitação contínua (Suave, J. et. al (2006)), Figura 2.16:

- i. Preparação da emulsão constituinte do núcleo composta por estireno anídrido maleico (SMA), nonilfenol etoxilado (NP-10) e pelo rejuvenescedor (óleo bastante denso e com alto teor de aromáticos utilizado como rejuvenescedor de superfície) (Fig. 2.16 (a));
- ii. Adsorção do agente encapsulante (melamina formaldeído) sobre as gotas formadas no passo anterior com a emulsão de óleo rejuvenescedor e o composto SMA e NP-10. A deposição contínua do material encapsulante é dada pela força iónica, dando-se a formação de uma camada polimérica (Figura 2.16 (c));
- iii. Formação das microcápsulas através da solidificação da camada polimérica por via do aumento da temperatura (Figura 2.16 (e)).

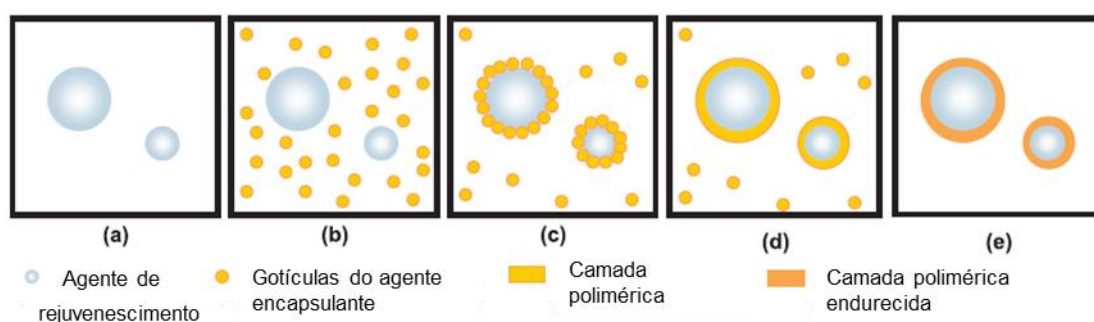


Figura 2.16 - Mecanismo de produção das microcápsulas por via da coacervação: (a) agente encapsulado em solução; (b) Formação das gotículas de líquido do encapsulante que irão formar a parede; (c) Deposição do agente encapsulante; (d) Formação da parede; (e) Solidificação do agente encapsulante (Suave, J. et. al (2006))

Neste estudo analisou-se via microscópio ótico a quantidade estireno anídrido maleico (SMA) a utilizar relativamente à do rejuvenescedor a encapsular e concluiu-se que há uma relação entre ambas com grande influência na dimensão e forma da estrutura da microcápsula. Pois, à medida que se aumenta a quantidade de SMA, ocorre a formação de microcápsulas de

maior dimensão. Assim, concluiu-se que a quantidade ótima a ser aplicada de SMA deve ser entre 1,5% a 2% em massa relativamente à de rejuvenescedor.

A análise termogravimétrica permitiu concluir que as microcápsulas têm capacidade para resistir à fase de produção de misturas betuminosas, atendendo a que a sua perda de massa se desenvolve a uma temperatura superior à que provoca o derretimento do betume.

Em 2012, Mookhoek, S. D. (2012), foi desenvolvida uma forma de armazenamento de um agente líquido em múltiplos compartimentos independentes, de forma a conduzir a um maior controlo de libertação desse agente, tendo por base uma estrutura de fibras, como alternativa à estrutura de cápsulas esféricas.

O processo de fabrico consiste numa dissolução de alginato de sódio em água, com posterior período de repouso, à temperatura ambiente, durante 30 minutos, resultando numa solução viscosa, à qual, posteriormente, é misturado um copolímero etileno-anidrido maleico (EMA), durante 5 minutos. Para o desenvolvimento de uma emulsão estável, é adicionado um composto de cloreto de cálcio, nitrato de bário e dietiltriamina, misturando os constituintes por um período de 10 minutos.

Posteriormente, a emulsão é colocada numa seringa, a partir da qual, por extrusão, é obtida uma fibra, que é colocada num banho de coagulação de cloreto de cálcio durante cerca de 10 segundos e, por fim, colocada num ambiente de convecção forçada de ar para uma secagem lenta durante um período de, pelo menos, 48 horas.

Em 2017, Tabaković, A. et. al (2017), avaliaram a eficiência da utilização numa mistura betuminosa, de fibras de alginato, contendo um rejuvenescedor encapsulado mediante o ensaio de tração indireta e o ensaio de fadiga por tração em quatro pontos

O processo de fabrico consistiu na produção de uma emulsão de alginato de sódio e de uma solução de um polímero surfactante de anidrido de polietileno-alt-maleico, a qual é dissolvida em água à temperatura de 70°C e misturada durante 60 minutos e arrefecida à temperatura ambiente. Posteriormente, é adicionado o rejuvenescedor e a emulsão inicialmente preparada, procedendo-se à sua mistura. A extração das fibras é efetuada de acordo com o método de Mookhoek, S. D. (2012), anteriormente desenvolvido.

No estudo de Tabaković, A. et. al (2017), foi concluído que a adição das fibras à mistura betuminosa não contribuiu para uma melhoria significativa da regeneração natural, apesar da maior recuperação de rigidez da mistura betuminosa com fibras, relativamente à de referência (sem fibras adicionadas). No entanto, como o estudo de sistemas de regeneração natural se encontram numa fase inicial, deverá ser desenvolvida uma maior investigação no desenvolvimento de uma diferente composição das fibras de alginato de cálcio, tendo por objetivo uma melhoria da sua resistência térmica e mecânica. Adicionalmente, os resultados indicaram que o ensaio de fadiga de flexão em quatro pontos será o mais indicado para a avaliação do desempenho da regeneração natural numa mistura betuminosa.

2.2.3 – Caracterização mecânica e regeneração

Garcia, A. et. al (2016) avaliaram as propriedades mecânicas decorrentes da aplicação de microcápsulas contendo óleo de girassol como agente rejuvenescedor, fabricadas segundo o método preconizado no estudo de 2010 (Garcia, A. et al. (2010)), através da saturação dos poros dos agregados com resina epoxy e cimento. No procedimento experimental foram produzidos 2 tipos de provetes cilíndricos com uma mistura betuminosa composta por um betume de penetração nominal 40/60 e agregados calcários sem microcápsulas (condição de referência) e outra com uma adição de 5% em massa das mesmas com 5 tipos de dimensões de diâmetro diferentes (2,2mm; 3,1mm; 3,6mm; 5,7mm e 7,0mm).

A avaliação das propriedades mecânicas das misturas foi realizada, utilizando o ensaio de resistência à tração indireta, o ensaio de avaliação do módulo de rigidez e de fadiga por tração indireta.

Os resultados permitiram concluir que a resistência da mistura é diminuída com a adição de microcápsulas em cerca de 30% e que o diâmetro das cápsulas utilizado não tem efeito na variação de resistência, o que, segundo os autores, se pôde inferir que a adoção das que têm maiores dimensões, que contêm mais óleo, mas que não são tão resistentes à compressão, podem ser utilizadas para a indução de maiores diminuições de viscosidade em misturas betuminosas envelhecidas.

No ensaio do módulo de rigidez foi verificado que a adição de microcápsulas reduz a rigidez da mistura betuminosa. Este decréscimo também foi observado com a diminuição do diâmetro das cápsulas utilizado. Segundo os autores, esta redução é provocada pela quebra de cápsulas durante o processo de fabrico da mistura, o que poderá ser resolvido com o reforço da resistência das cápsulas, ou compensando esta realidade com a adoção de um betume mais rígido nas misturas.

No ensaio de fadiga, foi possível verificar que as microcápsulas não tiveram qualquer efeito no período de vida útil da mistura betuminosa, o que permitiu concluir que a resistência à fadiga das cápsulas é equivalente à do betume e confirma que a utilização de microcápsulas de maiores dimensões, com maior quantidade de óleo, não terá um efeito na redução da durabilidade dos pavimentos rodoviários.

Assim, os autores concluíram que, caso seja aumentada a resistência das cápsulas em estudos subsequentes, a resistência e a durabilidade da mistura betuminosa não será afetada e, por conseguinte, o diâmetro máximo das cápsulas vai ser determinado, somente, em função da quantidade de óleo necessário para que ocorra a regeneração natural da mistura betuminosa na qual estão integradas.

A maior parte dos métodos de avaliação da regeneração natural das misturas betuminosas correspondem a ensaios mecânicos, nos quais, o nível de regeneração existente é avaliado mediante a comparação da resposta das misturas betuminosas com e sem períodos de repouso. Existem duas categorias de ensaio, nomeadamente ensaios de fadiga e ensaios de fratura:

- Ensaios de fadiga
 - Ensaios de fadiga com aplicação de cargas intermitentes: A carga é aplicada ao provete intermitentemente. Cada ciclo de carregamento é seguido de um período de repouso;
 - Ensaios de fadiga com períodos de repouso: O provete é sujeito a ciclos de carga contínuos, os quais são interrompidos por períodos de repouso e posteriormente retomados os ciclos de carga;
- Ensaios de fratura: O provete é levado à rotura e, posteriormente, tem um período de repouso e nova aplicação de carga até à rotura (Qiu, J. (2012)).

Em 2015, (Garcia, A. et. al (2015)) avaliaram o efeito regenerativo resultante da aplicação de microcápsulas de resina epoxy semelhantes às do estudo de 2010 (Garcia, A. et. al (2010)), já anteriormente citadas neste documento. O processo de avaliação da regeneração foi realizado mediante a visualização do teor de vazios microscopicamente após um ensaio de fadiga com a introdução de períodos de repouso.

Foram produzidas lajetas de ensaio com (5% em massa) e sem cápsulas (condição de referência). Posteriormente, foram aplicadas às lajetas um carregamento de compressão, sem confinamento, à velocidade de 1mm/minuto até que não fosse verificada qualquer deformação nos provetes. De seguida, foi aplicado um ensaio de carregamento cíclico, no qual foram aplicados diferentes patamares de ciclos de carregamento totais, de forma a ser determinado o número de ciclos limite correspondente à rotura das cápsulas.

Após o ensaio, as lajetas foram colocadas no congelador a -20°C para bloquear o processo de difusão do óleo. Mais tarde, foram transferidas do congelador para a estufa a 55°C, tendo aí permanecido durante 4h e, por fim, permaneceram durante 48h à temperatura ambiente.

O processo de temperaturas foi realizado, de forma a acelerar a difusão do óleo que demoraria dias a completar. No fim, os provetes foram novamente testados, mediante a aplicação de 800 ciclos de carregamento.

Os resultados obtidos permitiram concluir que os provetes com cápsulas apresentaram deformações mais rápidas aquando da aplicação do primeiro ensaio cíclico de carregamento, as quais podem ser devidas à diminuição de rigidez da mistura, dada a libertação de óleo das cápsulas, cuja estrutura tenha entrado em rotura durante a aplicação do carregamento inicial.

A regeneração foi avaliada por via da comparação do teor de vazios como um indicador da quantidade de microfissuras existentes em três fases: antes do carregamento, após o carregamento e após o período de repouso. Os resultados permitiram concluir um decréscimo de cerca de 45% dos danos existentes após o período de repouso. No entanto, dado o procedimento experimental adotado, não foi possível concluir se esse efeito regenerador foi devido às elevadas temperaturas utilizadas na fase de repouso ou se foi especificamente consequência da diminuição da viscosidade, provocada pela libertação do óleo das microcápsulas.

Em 2015, (Su, J. F. et. al (2015)), analisaram o efeito regenerativo da aplicação das microcápsulas, contendo um óleo regenerador denso com um alto teor de aromáticos, produzidas pelo método de polimerização *in situ* de metanol melamina formaldeído (MMF) desenvolvidas em 2012 (Su, J. F., & Schlangen, E. (2012)), cujo método de produção já foi abordado no presente documento.

O procedimento experimental utilizado passou pela produção de provetes de ensaio com um betume “são” com uma taxa de penetração de 80/100 e com um betume envelhecido artificialmente em estufa com uma taxa de penetração de 40/50, ao qual foram adicionadas diferentes quantidades de microcápsulas (2, 4, 6, 8, 10 e 12% em massa) durante o processo de fabrico do mesmo.

De forma a simular o fendilhamento nas amostras com betume envelhecido, foi colocada uma determinada quantidade de azoto líquido que, dada a fragilidade da baixa temperatura causada por tal adição, promoveu o desenvolvimento de microfissuras com uma largura de cerca de 10-15 μm .

Através da utilização de microscópio de fluorescência, foi possível a observação contínua do processo de fendilhamento induzido à temperatura de 0°C. A microfissura provocada fez com que as microcápsulas existentes no perímetro mais próximo fossem quebradas e que, por sua vez, o óleo do seu interior fosse libertado contribuindo para que, por ação capilar, preenchesse a mesma.

Posteriormente, foi efetuado um aquecimento prévio em estufa a 200°C durante 12 horas, seguido de um período de repouso de 60 dias.

Para a avaliação da eficiência do efeito da regeneração das microcápsulas, foram utilizados três parâmetros: O valor de penetração, a temperatura de amolecimento e a viscosidade.

Relativamente ao valor de penetração, o betume envelhecido apresentou valores que aumentaram com o aumento da percentagem de adição de microcápsulas, em que a adição de 10%, conduziu o betume envelhecido a valores semelhantes aos do betume original.

Na temperatura de amolecimento e viscosidade verificou-se um aumento desta propriedade com o envelhecimento do betume, o que pode ser justificado com o acréscimo da componente de asfaltenos no ligante, que favorece o endurecimento do material e um aumento dos valores destes parâmetros. No entanto, a crescente incorporação de microcápsulas contribuiu para a sua diminuição gradual até aos valores do betume sem envelhecimento.

Assim, este estudo permitiu confirmar o efeito benéfico na regeneração do betume envelhecido com a adição de microcápsulas com o agente de rejuvenescimento no seu interior.

Em 2015, (Li, R. et. al (2015)) desenvolveram microcápsulas com uma resina de ureia formaldeído com óleo rejuvenescedor com alto teor de aromáticos no seu interior pelo método de polimerização *in situ*. Atendendo a que a ductilidade de uma mistura betuminosa é a capacidade de deformação a uma determinada temperatura, antes de ocorrer rotura, a avaliação do efeito da regeneração com a adição das microcápsulas na mistura betuminosa foi utilizado o ensaio da ductilidade de acordo com a ASTM D113-07.

No procedimento experimental, a mistura betuminosa utilizada foi aquecida a 110°C e, posteriormente, foram produzidos provetes sem e com microcápsulas com diferentes dosagens (0,1; 0,3 e 0,5% em massa). Para a avaliação do nível de recuperação da mistura, graças à dosagem de microcápsulas, foi utilizada a seguinte equação:

$$D = \frac{L_{healed}}{L_{original}} * 100\% \quad (2.6)$$

em que: D é o nível de regeneração da ductilidade;

L_{healed} é a ductilidade do provete após a regeneração;

$L_{original}$ é a ductilidade do provete antes da regeneração.

Os resultados permitiram concluir que o efeito da adição das microcápsulas foi positivo, pois, foi verificado um nível de regeneração crescente a par com o nível de microcápsulas adicionado, tendo sido atingido valores de cerca de 40% de efeito com a junção de microcápsulas em 0,5% em massa.

Em 2016, Micaelo, R. et. al (2016) avaliaram a regeneração de forma semelhante ao estudo Garcia, A. et. al (2015), já abordado neste documento, mediante a aplicação de um carregamento de compressão uniaxial cíclico. O procedimento teve três fases, um carregamento inicial, ao que se seguiu um período de repouso (3h, 6h, 12h, 24h, 48h) à temperatura de 20°C, por forma a permitir haver tempo suficiente para a libertação do óleo, e, por fim, um novo carregamento.

O efeito da adição das microcápsulas foi avaliado mediante a comparação dos valores de rigidez entre o primeiro e o segundo carregamento.

No procedimento experimental foram testados três tipos de cápsulas com diferentes características morfológicas e de resistência. As três são constituídas por uma estrutura de alginato de cálcio e com óleo de girassol no seu núcleo, o qual foi escolhido, dado não ser necessário qualquer tratamento ou medida suplementar de segurança em laboratório. As do tipo I e II são compostas por um revestimento suplementar de uma resina epoxy-cimento, diferindo somente na relação óleo/água, com o valor de 1,0 para as do tipo I e de 0,5 para as do tipo II. Já as do tipo III, não têm qualquer revestimento extra e têm uma relação óleo água de 0,5.

A mistura betuminosa utilizada foi um AC 20 base 40/60 (EN13108-1). O envelhecimento da mistura foi simulado através da sua colocação em estufa a 85°C durante 12 dias, previamente à colocação das cápsulas e ao processo de fabrico de provetes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura. Para efeitos de comparação, foram também produzidos provetes sem cápsulas com e sem envelhecimento.

Os resultados permitiram concluir que a camada de epoxy-cimento se revelou dispensável, pois durante o processo de mistura, as cápsulas sem esse revestimento adicional, não entraram em rotura e, além disso, ainda apresentaram uma maior facilidade de adaptarem a sua forma aos agregados, contribuindo uma maior compacidade da mistura.

No primeiro ensaio cíclico de carregamento, nos provetes com microcápsulas foi verificada uma diminuição da rigidez ao fim dos primeiros 500 ciclos de carregamento, o que é justificado com a rotura das microcápsulas. Após o período de repouso, a rigidez dos provetes com microcápsulas aumentou, o que pode ser justificado, segundo os autores, com a regeneração natural da mistura betuminosa provocada pela libertação do óleo das mesmas. Comparativamente com os provetes sem cápsulas, foi verificado um comportamento constante da rigidez ao longo de igual período.

O tipo de cápsulas utilizado teve relevância no tipo de resultados apresentados. As cápsulas mais resistentes, com o revestimento exterior de epoxy cimento, tiveram resultados de rigidez semelhantes antes e após o período de repouso, contrariamente às que não o tinham, o que significa que o revestimento epoxy cimento suplementar dificulta a libertação de óleo e, assim, a regeneração da mistura betuminosa.

Relativamente à resistência à deformação acumulada, foi verificada nos provetes com cápsulas, uma crescente deformação ao longo da aplicação dos ciclos de carregamento. Principalmente, após o período de repouso, em que a taxa de deformação ao longo dos ciclos foi consideravelmente maior nos provetes com cápsulas relativamente aos sem cápsulas. Tal, pode ser justificado com a libertação do óleo das cápsulas, a qual levou a uma diminuição da viscosidade da mistura betuminosa.

O teor de vazios e as fissuras diminuíram bastante nas misturas com cápsulas, tendo atingido valores de redução da ordem dos 50%, principalmente nas cápsulas sem o revestimento epoxy-cimento, o que permitiu confirmar o efeito regenerador das mesmas.

Em 2017, (Al-Mansoori, T. et. al (2017)) avaliaram o efeito da introdução de microcápsulas de alginato de cálcio com óleo de girassol no seu núcleo, produzidas pelo método de polimerização *in situ*, nas propriedades mecânicas, bem como o seu contributo para a regeneração natural decorrente da sua aplicação na mistura betuminosa. Foram produzidos provetes cilíndricos e prismáticos de mistura betuminosa AC 20 base 40/60, constituídos por misturas sem cápsulas e com 3 dosagens em massa (0,1%; 0,25% e 0,5%).

Para os provetes cilíndricos, foram efetuados ensaios do módulo de rigidez (EN 12697-26) e de resistência à fadiga em controlo de força segundo testes de tração indireta.

A regeneração natural decorrente da aplicação das microcápsulas foi avaliada com base na recuperação da resistência à flexão, após a execução de um ensaio de flexão em 3 pontos (3PBT) em provetes prismáticos. De forma a ser provocada uma fissura única no provete em teste, foi executado um entalhe na sua face inferior (zona de tração aquando, da aplicação do carregamento no ensaio). A aplicação da carga foi realizada a uma velocidade de 2mm/min a uma temperatura de -20°C até ser atingida a rotura do provete em 2 metades (Figura 2.17 - Passo A).

Posteriormente, após o ensaio, foi colocada uma membrana de polietileno de baixa densidade entre as duas partes do provete, por forma a prevenir que não ocorresse o encerramento da fenda provocado pelo carregamento anterior, e, adicionalmente, foram confinadas num molde metálico. De forma a ocorrer um carregamento uniforme do provete para quebrar as microcápsulas e, assim, induzir a libertação do óleo do seu interior, foi colocado um prato metálico na face superior e foi efetuado um carregamento a uma velocidade de 2mm/min até ser atingida uma deformação de 5mm, de modo a simular o efeito do carregamento do tráfego rodoviário (Figura 2.17 - Passo B).

De seguida, foi retirada a membrana de polietileno e procedeu-se a um período de repouso até às 200 horas, para que o óleo efetuasse o seu efeito regenerador à fenda que tinha sido criada inicialmente (Figura 2.17 - Passo C). No fim do processo foi efetuado novo ensaio de 3 pontos até à rotura e o efeito regenerador foi calculado de acordo com a equação:

$$HR = \frac{FS_2}{FS_1} \quad (2.7)$$

em que: HR é o nível de regeneração;

FS_1 é a carga última aplicada no primeiro Ensaio de flexão de 3 pontos
efetuado no procedimento

FS_2 é a carga última aplicada no segundo Ensaio de flexão de 3 pontos efetuado no procedimento

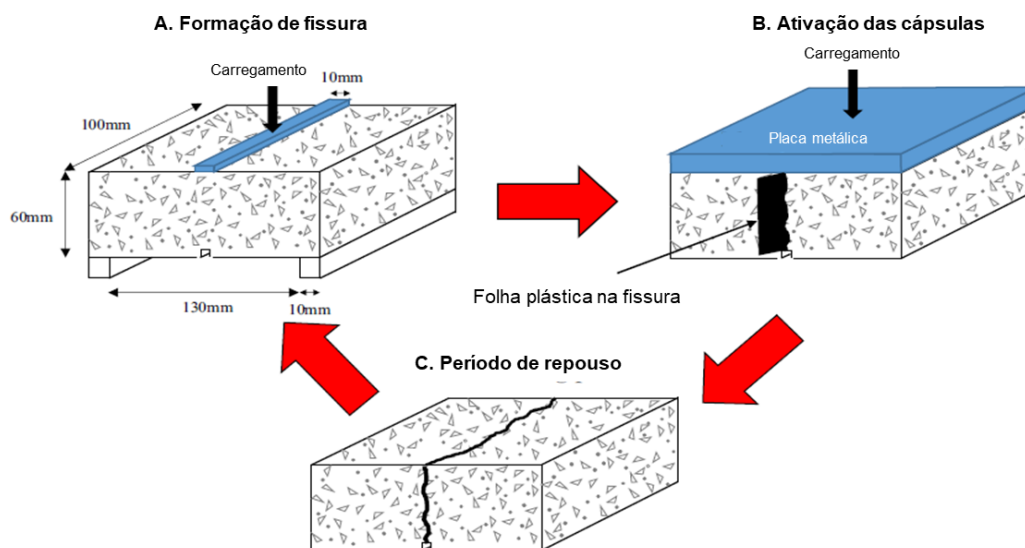


Figura 2.17 - Procedimento de avaliação da regeneração natural (Al-Mansoori, T. et. al (2017))

Os resultados apresentados permitiram concluir o efeito positivo na regeneração da mistura betuminosa com a adição das microcápsulas. Foi verificado um nível de regeneração bastante superior das misturas com cápsulas relativamente às que não as tiveram na sua constituição. As misturas com 0,5% em massa de cápsulas atingiram níveis de cerca de 50% de rejuvenescimento. O período de repouso infligido teve um efeito benéfico no aumento do índice de regeneração somente até às 72h, estabilizando a partir daí, o que indicou que não haveria grande vantagem para a regeneração, proceder-se a períodos de repouso superiores.

Relativamente ao módulo de rigidez e à resistência à fadiga, foi verificado que as misturas betuminosas com microcápsulas têm valores de módulo de rigidez inferiores às misturas sem microcápsulas. Segundo os autores, tal facto poderá ser corrigido em estudos futuros com a redução do diâmetro das microcápsulas. Na resistência à fadiga, foi verificado que os provetes de mistura betuminosa com microcápsulas apresentaram valores 15% inferiores aos provetes sem microcápsulas na sua constituição o que, de acordo com os autores, se pode dever ao módulo de rigidez inferior acima referido.

Em 2018, Norambuena-Contreras, J. et. al (2018), foi avaliada a influência da ordem do procedimento da mistura dos constituintes da mistura betuminosa (com e sem microcápsulas com óleo de girassol como agente de rejuvenescimento), bem como, a avaliação do módulo de rigidez e da resistência à fadiga. A regeneração da mistura betuminosa, em virtude da adição de microcápsulas na sua constituição foi avaliada segundo o ensaio de flexão em três pontos

(3PBT), de acordo com o mesmo procedimento de ensaio do estudo Al-Mansoori, T. et. al (2017), já apresentado neste documento (Figura 2.17). A mistura betuminosa avaliada foi um AC 20 base 40/60.

Os tipos de misturas betuminosas desenvolvidos foram: duas misturas com pré-aquecimento das microcápsulas a uma temperatura de 160 °C durante 4 horas, com adição no início ou no fim da mistura do betume com os agregados, misturas M1 e M2, respetivamente; duas misturas sem pré-aquecimento das microcápsulas, com descongelamento a uma temperatura de 20 °C durante 4 horas, com início ou no fim da mistura do betume com os agregados, misturas M3 e M4, respetivamente. Como condição de referência, foram produzidos provetes sem microcápsulas.

Neste estudo, foi avaliado o efeito do envelhecimento da mistura betuminosa, por via da simulação em laboratório, colocando em estufa os provetes a uma temperatura de 85 °C durante 240 horas.

Os resultados permitiram concluir que a adição das microcápsulas teve um efeito na redução da rigidez dos provetes, o que poderá ser justificado com o aumento da porosidade, em virtude da adição de microcápsulas.

Relativamente ao nível de regeneração, foram apresentados valores de regeneração, em média, para os provetes com cápsulas, superiores aos sem cápsulas, tanto em condições de envelhecimento provocado como em caso contrário. No entanto, em condições de envelhecimento provocado, os provetes apresentaram níveis de regeneração inferiores comparativamente com os que não tiveram envelhecimento, o que pode ser justificado com o aumento da viscosidade do óleo com esse processo, dificultando a saída do mesmo do núcleo das microcápsulas e, assim, contribuir para níveis de regeneração inferiores. Em condições de envelhecimento, também foi possível verificar uma diminuição da diferença de rejuvenescimento entre os provetes com e sem cápsulas.

Para avaliar a eficiência das cápsulas no processo de regeneração, foi determinada a viscosidade de amostras com microcápsulas com envelhecimento, em que foram apresentados a valores de redução entre 19,55% e 26,33%, podendo-se concluir que as cápsulas tiveram um efeito benéfico no rejuvenescimento da mistura betuminosa.

Dado o conjunto de resultados apresentado, os autores recomendam que a ordem de adição das microcápsulas deverá ser no final do processo de mistura do betume com os agregados, sem a necessidade de pré-aquecimento em estufa, de forma a que não ocorra oxidação das mesmas, ou seja, a mistura tipo M4.

Em 2018, Paciência, E. A. E. (2018) avaliou o efeito da incorporação de 0,5% em massa de cápsulas de alginato de cálcio, contendo óleo de girassol, numa mistura betuminosa do tipo AC 20 base 35/50. Foi também avaliada a adição de 0,1% em massa de óleo de girassol à mistura, para simulação da libertação do óleo pelas cápsulas durante o processo de fabrico e

compactação da mistura betuminosa. Foram produzidos provetes cilíndricos e realizados ensaios de adesividade entre o betume e os agregados da mistura betuminosa. Foi constada uma grande semelhança de resultados na avaliação deste parâmetro, nos provetes com cápsulas ou com óleo na sua constituição. A avaliação da regeneração foi feita mediante a realização do ensaio de tração indireta, numa primeira fase; a aplicação de uma carga axial durante 5 minutos, para simulação do carregamento do tráfego rodoviário, após o aparecimento de uma fissura; um período de repouso em diferentes condições de temperatura e tempo e, por fim, a realização do ensaio de tração indireta, numa segunda fase. A avaliação da autorregeneração foi feita mediante a comparação dos resultados do primeiro com o segundo ensaio.

Como resultados, os provetes com cápsulas ou óleo apresentaram taxas de recuperação superiores aos provetes de referência (sem cápsulas e sem óleo). No entanto, não ocorreram diferenças significativas entre os provetes com cápsulas relativamente aos que continham óleo na sua constituição.

3 – Programa experimental

3.1 – Introdução

Neste capítulo é realizada uma descrição dos materiais utilizados no procedimento experimental desenvolvido no âmbito da presente dissertação, bem como dos ensaios laboratoriais efetuados para a caracterização mecânica das misturas betuminosas.

O objetivo do programa experimental foi a avaliação das propriedades mecânicas e de autorregeneração de misturas betuminosas decorrente da incorporação das microcápsulas em estudo na mistura betuminosa que, no caso, uma mistura do tipo AC20. Para tal, o programa foi dividido em 2 partes (Figura 3.1), em que na parte I foram produzidos provetes prismáticos e a sua respetiva análise laboratorial, mediante uma simulação das condições de serviço da mistura betuminosa, com uma simulação de envelhecimento em laboratório e ensaios de caracterização do módulo de rigidez e da resistência à fadiga, utilizando o ensaio de flexão em quatro pontos (4PBT), em momentos distintos para avaliação dos efeitos provocados. Na parte II foram produzidas lajes de ensaio para avaliação do comportamento à deformação permanente da mistura betuminosa. Em ambas as partes foram analisados 4 níveis de dosagem de cápsulas: 0% (referência); 0,5%; 0,75% e 1% em massa.

O programa experimental foi realizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), no Departamento de Transportes com o apoio da Unidade de Pavimentos e Materiais para Infraestruturas de Transporte (UPAVMAT/LNEC-EM) e no Departamento de Estruturas. A análise das microcápsulas utilizadas foi efetuada no Departamento de Engenharia Civil e no Departamento de Engenharia dos Materiais da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL).

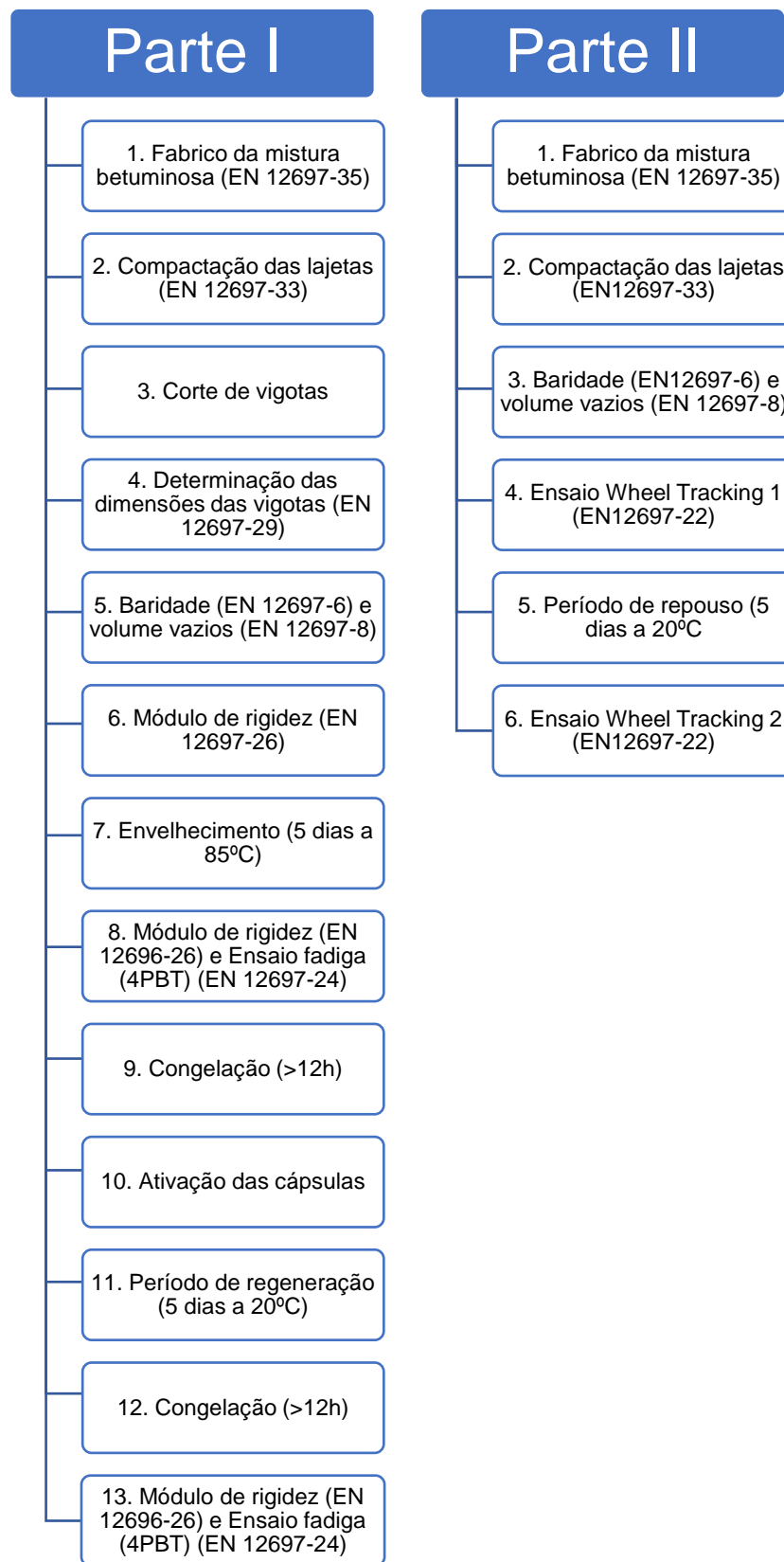


Figura 3.1 - Esquema do procedimento experimental adotado na presente dissertação

3.2 – Materiais

Os materiais utilizados foram fornecidos por duas empresas, nomeadamente a Galp Energia com o betume (lote 5648/011/18) e a Alves Ribeiro com os agregados, naturais e de origem calcária, a partir do estaleiro em Camarate. As cápsulas foram fornecidas pela Universidade de Nottingham.

3.2.1- Betume e agregados

Para a formulação da mistura foi utilizado um betume de pavimentação de penetração nominal 35/50. Os agregados utilizados foram de origem calcária. As frações utilizadas foram a 10/20 mm, 4/12 mm, 0/4 mm e filler (Figura 3.2).

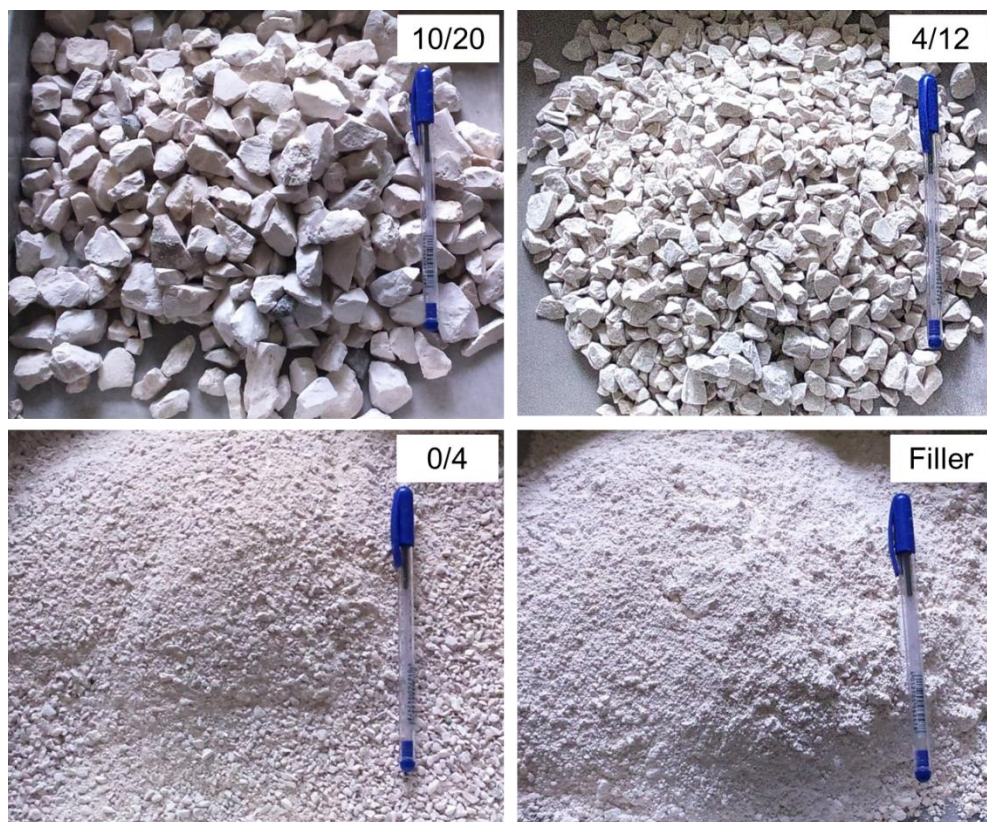


Figura 3.2 - Frações de agregados calcários utilizados nas misturas betuminosas

3.2.2- Cápsulas

As cápsulas utilizadas nesta dissertação foram produzidas na Universidade de Nottingham e têm um diâmetro médio de 2,8 mm. A membrana exterior é constituída por uma estrutura polimérica de alginato de cálcio e o seu núcleo por óleo de girassol, o qual funcionará como agente rejuvenescedor e em que a sua escolha foi devida ao seu reduzido custo de aquisição, à sua estabilidade térmica e ao facto de não serem exigidos procedimentos específicos de segurança para a sua operação (Zargar, M. et al. (2012); Ji, J. et al. (2016)).

O método de fabrico destas cápsulas é por via da polimerização *in situ* (Figura 3.3): é feita uma emulsão de água com o óleo de girassol, à qual é adicionado o alginato de sódio ($C_6H_7O_6Na$), atuando como um emulsionante até ser atingida a sua completa homogeneização. Simultaneamente, é preparada uma solução de cloreto de cálcio ($CaCl_2$) à qual são deixadas cair gotas da emulsão produzida a uma altura definida e pressão de libertação de gotas de uma seringa pré definidas, controlando-se, dessa forma, a dimensão e o formato das microcápsulas produzidas (Norambuena-Contreras, J. et al. (2018); Al-Mansoori, T. et al. (2017)).

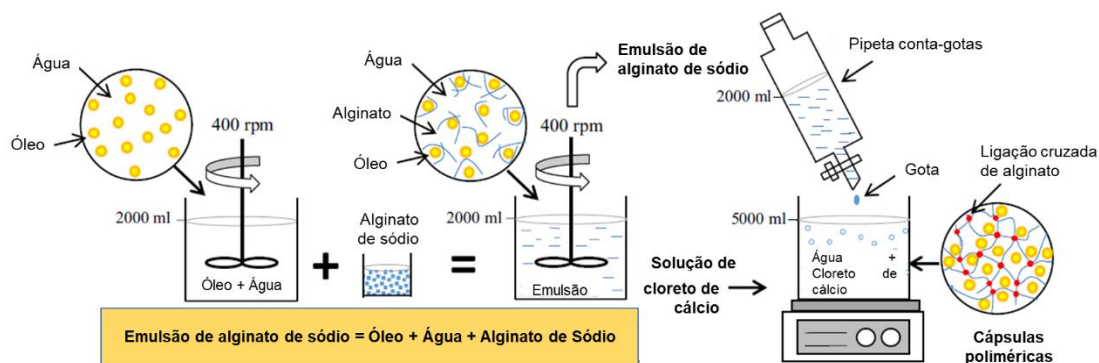


Figura 3.3 - Procedimento de produção das microcápsulas Norambuena-Contreras, J. et al. (2018)

3.3 – Métodos experimentais

3.3.1- Ensaio termogravimétrico

De forma a que não ocorram alterações nocivas nas microcápsulas durante o processo de fabrico das misturas betuminosas, é necessário que resistam a uma temperatura entre os 160°C e 180°C, próprias desta fase. Assim, procedeu-se à análise termogravimétrica das cápsulas para analisar a perda de massa ocorrida, em função da temperatura.

Segundo a ICTAC – “International Confederation of Thermal Analysis and Calorimetry”, a análise termogravimétrica é definida como uma técnica que estuda a relação da massa de um

material, que é medida ao longo do tempo em função da alteração da temperatura de um ambiente com a atmosfera controlada.

Os parâmetros mais relevantes deste ensaio são a massa da amostra, a taxa de aquecimento e o tipo de gás do ambiente de ensaio.

Os ensaios foram realizados utilizando um equipamento de análise termogravimétrica, *NETZSCH 449 F3 Jupiter*, ligado a uma unidade de refrigeração bem como a um software de análise de dados. Os parâmetros experimentais foram: atmosfera dinâmica de um gás inerte, azoto N₂, de 50 mL/min e amostras aquecidas na gama de 25°C a 600°C com uma velocidade constante de 10K/min. Foi analisada uma amostra de 10 cápsulas.

Na figura 3.4 está representada a curva termogravimétrica TGA da amostra de cápsulas utilizadas. Para a temperatura de 100°C, houve uma perda de 1,7% e, para as temperaturas usuais da produção de misturas betuminosas entre 160°C e 200°C, verificaram-se perdas de massa de 3,8% e 6,6%, respetivamente.

Na análise da curva DTG, derivada da curva TGA, verifica-se que a perda de massa mais relevante ocorre somente entre os valores de temperatura de 360°C e 390°C, com perdas de 22,9% e 44,3%, respetivamente.

Os resultados apresentados permitiram confirmar a resistência das microcápsulas às elevadas temperaturas existentes na produção das misturas betuminosas com uma reduzida perda de massa.

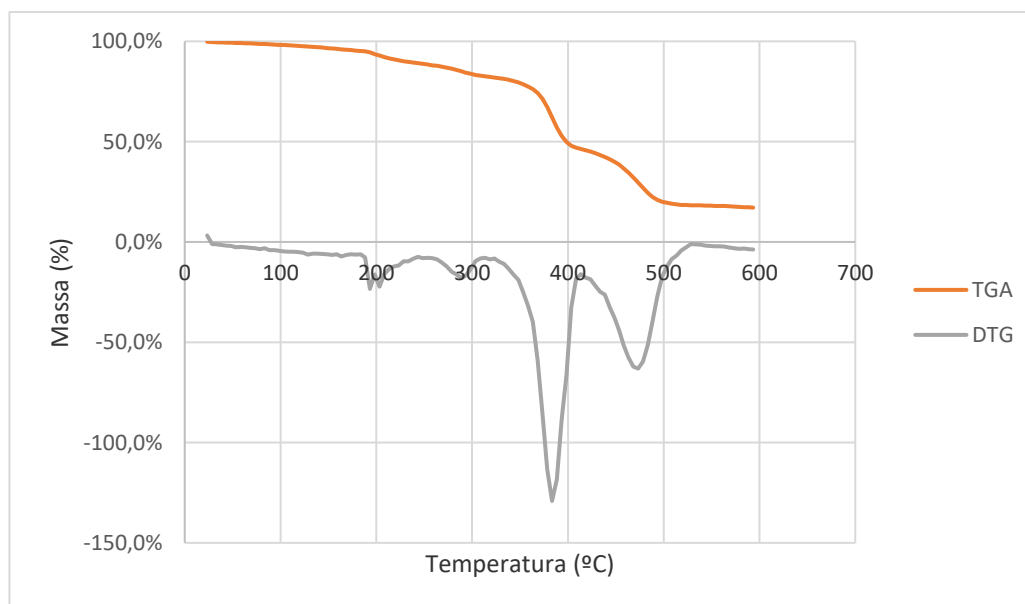


Figura 3.4 - Ensaio termogravimétrico das microcápsulas

3.3.2- Ensaio de compressão mecânica em cápsulas

As microcápsulas estão sujeitas a forças de compressão, logo desde que são aplicadas no fabrico da mistura betuminosa e ao longo do período de vida útil do pavimento, com a passagem do tráfego rodoviário. Assim, é necessário que tenham valores de resistência suficientes de forma a que não haja uma libertação do óleo precoce ou que sejam destruídas.

A análise da resistência mecânica das cápsulas foi realizada no Departamento de Ciências dos Materiais da FCT-UNL, com um ambiente de 21°C num equipamento de carregamento, com uma carga de início de ensaio de 0,001 N, uma velocidade de carregamento de 0,7 mm/ min. e uma célula máxima de carga de 95 N, (Figura 3.5). Foi analisada uma amostra de 10 cápsulas, escolhidas aleatoriamente.

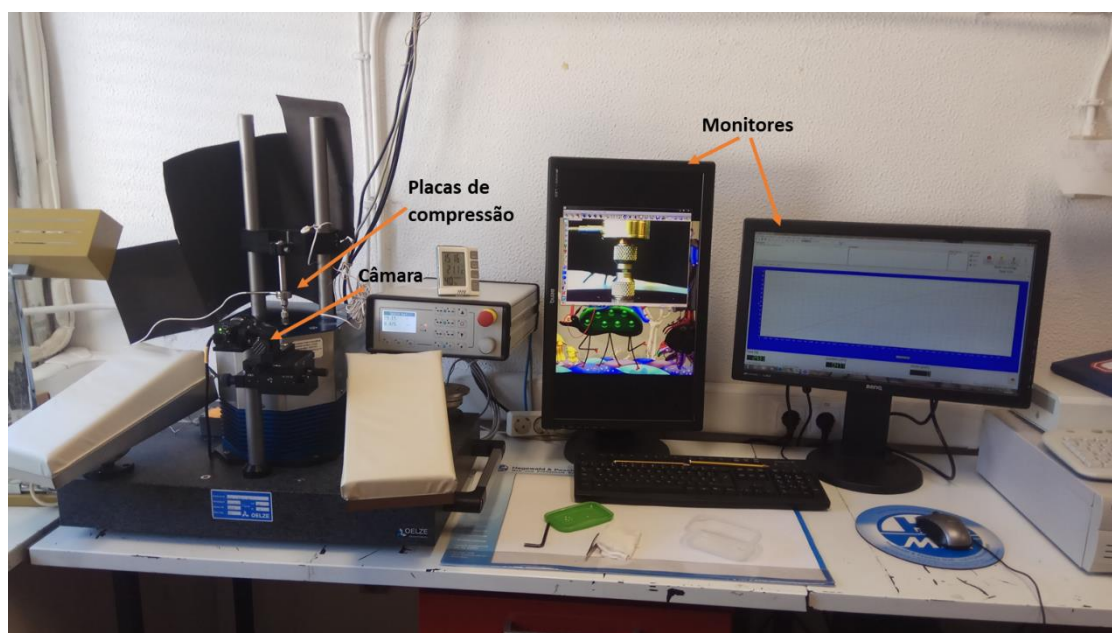


Figura 3.5 - Equipamento de análise da resistência à compressão das microcápsulas

As dimensões das cápsulas foram analisadas através do programa de processamento de imagem *ImageJ*. Tendo em conta o conhecimento da dimensão real da célula de carga (Figura 3.6), foi possível determinar, medindo através desse software, a dimensão real das cápsulas. Assim, o valor médio de dimensão das cápsulas foi de 2,8 mm.

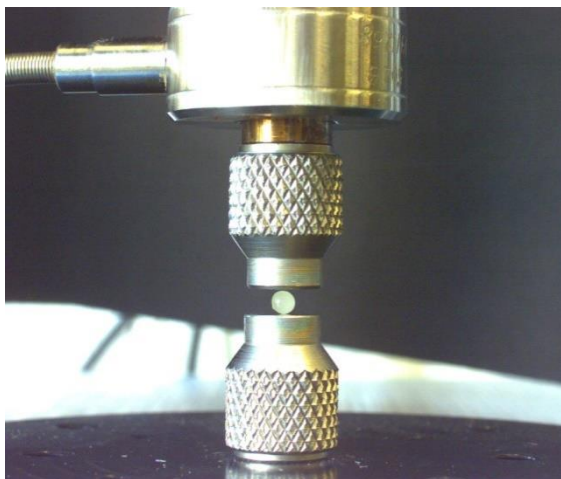


Figura 3.6 - Microcápsula colocada para ensaio de resistência mecânica

No ensaio de compressão das cápsulas (Figura 3.7) foi possível verificar que, inicialmente, apresentaram um comportamento elástico, seguido de um pico de carga, a partir do qual se dá uma queda abrupta do nível de carregamento suportado pelas cápsulas. Neste ponto, foi dada a rotura da membrana exterior, o que possibilita a libertação do óleo do seu interior. A resistência à compressão atingida foi de 33,0 N. Posteriormente, dá-se um decréscimo da rigidez das cápsulas e, como a libertação do óleo é dada de forma gradual à medida que a cápsula vai sendo comprimida, e não de uma só vez após a rotura da membrana externa, a resistência ao carregamento vai aumentando gradualmente, coincidindo com a progressiva destruição da cápsula.

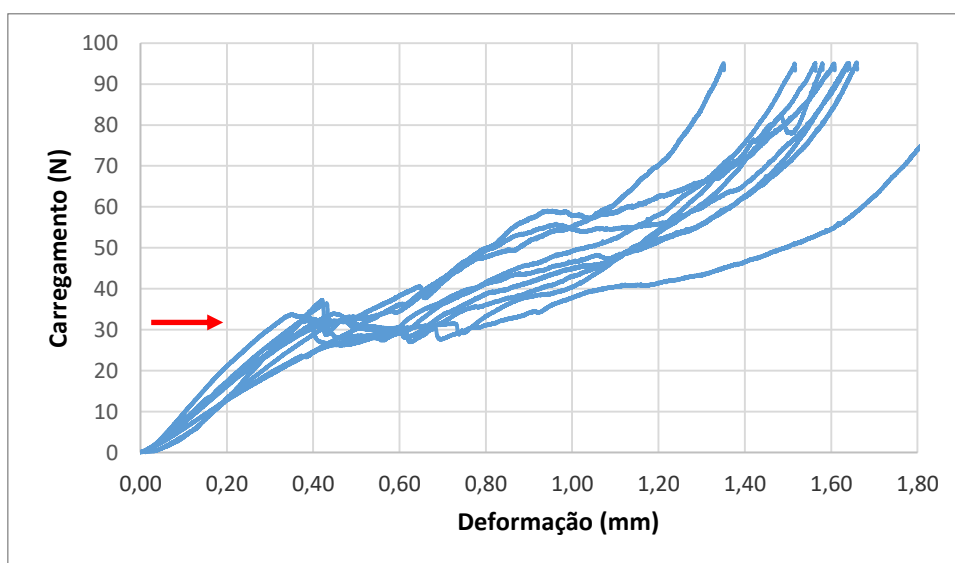


Figura 3.7 - Ensaio de resistência mecânica das microcápsulas

Em resumo, as características das microcápsulas utilizadas são:

Tabela 3.1 - Características das microcápsulas

Diâmetro (mm)	Perda de massa com a temperatura			Resistência à compressão a 20°C (N)
	100°C (%)	160°C (%)	200°C (%)	
2,8 (± 0,1)	1,7	3,8	6,6	33,0 (± 2,2)

3.3.3- Fabrico e compactação da mistura betuminosa

Neste estudo, foi utilizada uma mistura betuminosa a quente (MBQ) do tipo AC20 base 35/50. De acordo com o esquema de procedimento experimental da figura 3.1, foram produzidos provetes com dimensões distintas.

Para a parte I foram produzidas duas lajetas com as dimensões de 400x300x50 mm para cada dosagem de microcápsulas: sem cápsulas (condição de referência); 0,5%; 0,75% e 1%. A partir dessas lajetas foram obtidos, por corte mecânico, provetes prismáticos com as dimensões 400x50x50 mm. Para a parte II, foram produzidas lajetas com as dimensões 305x305x50 mm com as mesmas dosagens de cápsulas testadas na parte I: sem cápsulas (condição de referência); 0,5%; 0,75% e 1%.

As quantidades de agregados e microcápsulas utilizadas em cada tipo de mistura analisada nas diferentes partes do procedimento experimental estão descritas nas Tabelas 3.2 e 3.3.

Tabela 3.2 - Quantidades utilizadas na produção de provetes para a parte 1 do procedimento experimental

Materiais		%	MB SC [g]	MB 0.5% Cáp. [g]	MB 0.75% Cáp. [g]	MB 1% Cáp. [g]
Rejuvenescedores	Cápsulas	0; 0,5; 0,75; 1	-	73,3	109,6	145,7
Betume		4,7	693,7	685,8	681,9	678,1
Agregados	Brita 2 - 12/20	20	2813,3	2781,3	2765,5	2749,8
	Brita 1 - 4/12	28	3938,6	3893,8	3871,7	3849,7
	Areia (calcário) - 0/4	49	6892,5	6814,2	6775,5	6737,0
	Filler	3	422,0	417,2	414,8	412,5
Total			14760,1	14665,8	14619,1	14572,8

Tabela 3.3 - Quantidades utilizadas na produção de provetes para a parte 2 do procedimento experimental

Materiais		%	MB SC [g]	MB 0.5% Cáp. [g]	MB 0.75% Cáp. [g]	MB 1% Cáp. [g]
Rejuvenescedores	Cápsulas	0; 0,5; 0,75; 1	-	56,8	85,0	113,0
Betume		4,7	537,8	531,7	528,6	525,6
Agregados	Brita 2 - 12/20	20	2180,9	2156,1	2143,8	2131,7
	Brita 1 - 4/12	28	3053,2	3018,5	3001,4	2984,3
	Areia (calcário) - 0/4	49	5343,1	5282,5	5252,4	5222,6
	Filler	3	327,1	323,4	321,6	319,7
Total			11442,1	11369,0	11332,9	11296,9

Para o fabrico dos provetes, segundo a EN 12697-35:2007, após a pesagem dos agregados, procedeu-se ao seu pré-aquecimento, bem como dos utensílios metálicos utilizados para a mistura numa estufa à temperatura de 160°C durante 4 horas.

Posteriormente, procedeu-se à mistura dos agregados com o betume, também previamente aquecido a 160°C em estufa, de forma a facilitar a mistura, numa cuba metálica integrada numa misturadora de eixo planetário regulável para preparação de amostras em laboratório (Figura 3.8) durante 2 minutos e com uma velocidade de 125 rpm. Nas amostras que continham microcápsulas, aplicou-se a um tempo de 20 segundos suplementar de mistura dos constituintes.



Figura 3.8 - Misturadora utilizada no fabrico das misturas betuminosas

Posteriormente, foi efetuada a compactação das lajetas no dispositivo *roller compactor* (Figura 3.9), de acordo com a EN 12697-33:2007. Este método de compactação foi escolhido, devido a ser aquele que mais aproxima as condições de laboratório às de obra, permitindo produzir provetes prismáticos. O equipamento com rolo metálico foi concebido em Inglaterra, na Universidade de Nottingham. A compactação é feita, colocando a mistura betuminosa, logo após a mistura dos seus constituintes, no molde, previamente untado com uma massa descofrante, numa câmara de controlo de temperatura. Através de um movimento longitudinal cíclico da base onde está colocado o molde, o rolo vai adensando a amostra à sua passagem com a aplicação de uma força descendente, até ser atingida a altura de compactação pretendida que, no caso de todas as lajetas produzidas, foi de 50 mm. Após o fim do processo de compactação, o molde foi deixado a arrefecer à temperatura ambiente na sala do laboratório, para que não ocorressem deformações ao desmoldar a lajeta.

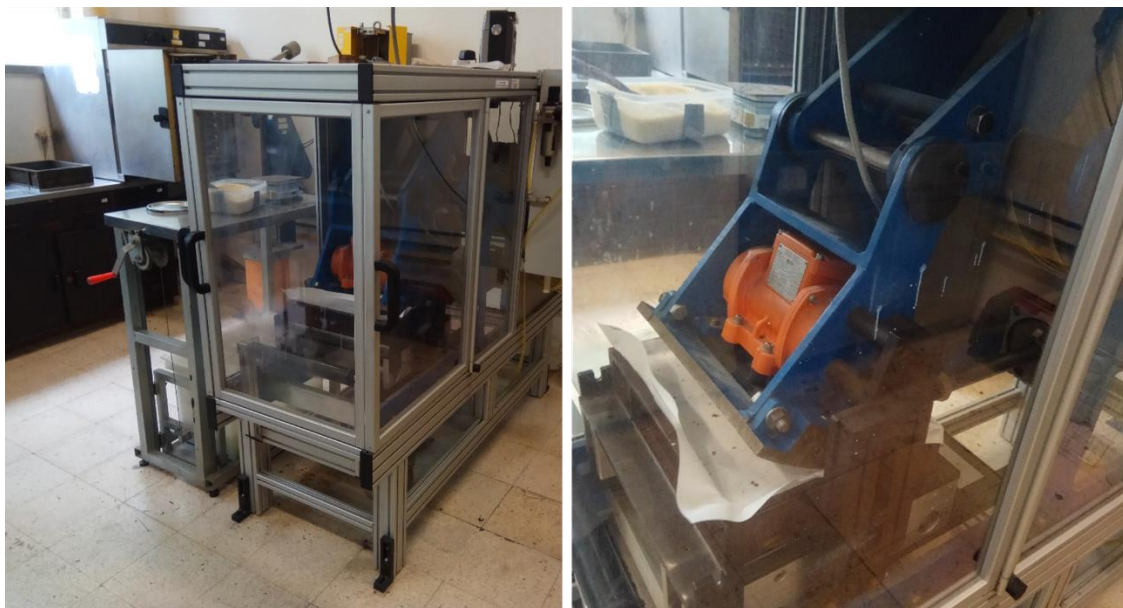


Figura 3.9 - Compactador de rolo metálico (modelo CRT-RCMPV, *Cooper Technology*)

Posteriormente, foi feita a desmoldagem das lajetas e procedeu-se à obtenção dos provetes prismáticos por corte mecânico com serra, tendo sido medidas as suas dimensões com uma craveira segundo a EN 12697-29:2002 (Figura 3.10).

Relativamente às dimensões dos provetes de ensaio, de acordo com a EN 12697-29:2002, a largura (B) e a altura (H) dos provetes devem ser determinadas nos pontos em que os quatro apoios têm contacto com a viga no Ensaio de flexão. Os valores de cada dimensão por viga correspondem à média aritmética dos valores verificados. O comprimento total da viga também deve ser medido quatro vezes, com posterior média aritmética dessas medições. A determinação destas medições no procedimento experimental em curso foi efetuada imediatamente antes do ensaio da baridade, já acima desenvolvido.

Como condições impostas, a Norma de ensaio aplicável refere que a largura e a altura devem ser pelo menos três vezes superiores à máxima dimensão do agregado da mistura. O comprimento efetivo (L) do provete corresponde à distância entre os dois apoios externos e deverá ser, no mínimo, seis vezes superior ao valor da máxima dimensão do agregado. Já o comprimento total do provete (L_{tot}) deverá ter uma dimensão que não exceda num valor superior a 10% o valor verificado no comprimento efetivo.

Para garantir a esbelteza do provete a ensaiar, a Norma também refere que o comprimento efetivo seja no mínimo seis vezes superior ao valor máximo de largura ou de altura. Como limite entre medições, para assegurar uma maior regularidade nos provetes, é estabelecido que na largura e na altura não deve ocorrer uma diferença superior a 1,0 mm e, no comprimento, não deve existir uma diferença superior a 2,0 mm.



Figura 3.10 - Corte mecânico dos provetes e respectivas dimensões

3.3.4- Propriedades volumétricas

Para avaliação das propriedades volumétricas dos provetes, foi realizado o ensaio de baridade, segundo a EN 12697-6:2012, método B – provete saturado com superfície seca (SSD) (Figura 3.11). Entende-se por baridade, a massa pelo volume ocupado, considerando a totalidade de vazios existente, bem como a temperatura de ensaio. Este método é recomendado para avaliação de provetes que têm uma granulometria densa, com índice de vazios até 5 % e com um nível de absorção de água baixo ou uma velocidade de drenagem lenta. O procedimento de ensaio apresenta os seguintes passos:

- Determinação da massa do provete seco (m_1). O valor é determinado, quando o provete apresentar uma massa constante. Ou seja, em duas pesagens consecutivas, não ocorrer uma diferença entre si superior a 0,1%;
- Determinação da massa volúmica da água à temperatura de ensaio com aproximação a $0,1 \text{ Kg/m}^3$ (ρ_w);
- Imersão do provete em água com o valor da temperatura medido, durante o período de 30 minutos, ou até a sua massa imersa já não sofrer alteração para, assim ser atingida a saturação total do espécime;
- Determinação da massa do provete saturado, quando imerso em água (m_2);
- Remoção do provete da água, secar a superfície e determinação da sua massa imediatamente (m_3). De acordo com a EN 12697-6:2012, caso o provete, após a secagem, continuasse a drenar água, ter-se-ia de mudar a metodologia de ensaio para o método C- provete com a superfície exterior selada.

Esse método é indicado para materiais com um índice de vazios de até 15 %, no entanto, é raramente utilizado. Como tal não ocorreu em qualquer dos provetes, confirmou-se que o método adotado foi o correto.

O valor da baridade pode então ser calculado, após o procedimento acima descrito, de acordo com a seguinte equação:

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \quad (3.1)$$

Assim, foi possível controlar a qualidade dos provetes produzidos, em função dos valores apresentados de baridade pelos provetes, comparativamente com os valores teóricos calculados no estudo de formulação.

A porosidade também foi calculada, segundo a EN 12697-8:2003, com arredondamento a 0,1% mais próximo, de acordo com a equação:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100\% \quad (3.2)$$

em que:

V_m é a porosidade;

ρ_m é a baridade máxima teórica (Kg/m³);

ρ_b é a baridade do provete determinada em ensaio (Kg/m³).



Figura 3.11 - Ensaio da baridade

3.3.5 – Caracterização da rigidez e da resistência à fadiga

A avaliação das características mecânicas das misturas betuminosas em laboratório permite determinar o comportamento de deformabilidade, de resistência à fadiga e às deformações permanentes. Assim, os procedimentos de ensaio simulam as condições mais próximas possíveis das condições em serviço a que as misturas betuminosas quando aplicadas nos pavimentos estão sujeitas, tanto ao nível da temperatura, como das condições de aplicação da carga.

A avaliação do módulo de rigidez é realizada de acordo com a EN 12697-26:2012. Este ensaio é realizado com baixas extensões e um número de ciclos de carga reduzido. Deste modo, não ocorre uma degradação do material, apresentando um comportamento aproximadamente elástico linear. Assim, este é caracterizado por ser um ensaio não destrutivo. (Baptista, A. M. C. (2007)).

A resistência à fadiga das misturas betuminosas traduz-se pela sua capacidade de resistir a sucessivos esforços de flexão sem atingir a rotura, a qual pode ser expressa por uma relação entre a tensão ou extensão inicial e o número de repetições de carga que conduzem à rotura. A resistência à fadiga depende de vários fatores, entre os quais, a temperatura, a frequência e o modo de aplicação da carga (tensão ou extensão controlada).

A frequência depende da velocidade de aplicação da carga, isto é, da velocidade de circulação do tráfego rodoviário em condições de serviço. O tempo de aplicação da carga aumenta com a diminuição da velocidade e vice-versa.

Nos ensaios realizados com tensão controlada, a carga permanece constante nas várias aplicações, sendo que a deformação do provete vai aumentando, à medida que a rigidez do material vai diminuindo. Para extensão controlada, a amplitude da extensão ou do deslocamento é mantida constante para as várias aplicações de carga, pelo que a tensão aplicada vai diminuindo ao longo do ensaio, já que a rigidez do material também reduzindo (Figura 3.12). Segundo Tangella, S. R. et al. (1990), os ensaios em tensão controlada são mais indicados para camadas betuminosas de maior espessura e os de extensão controlada para camadas de menor espessura, aproximadamente menor que 8 centímetros.

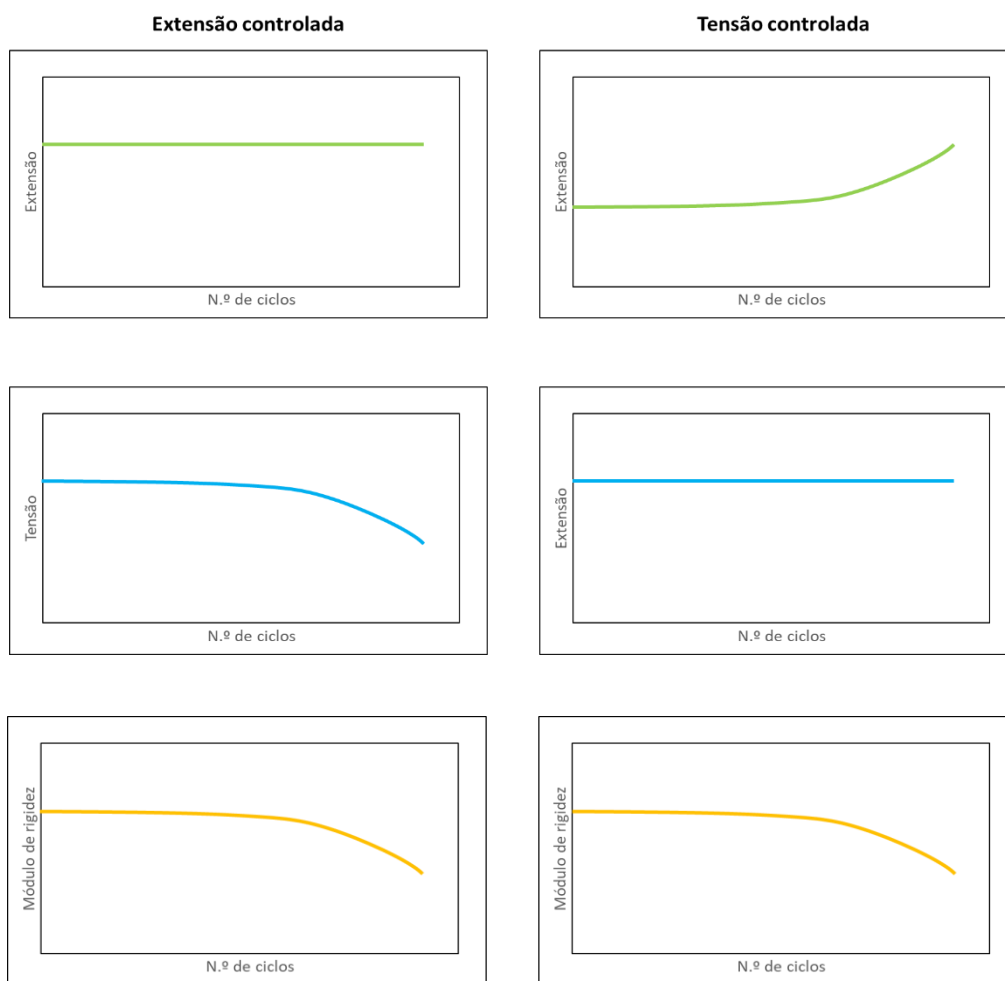


Figura 3.12 - Evolução típica da extensão, da tensão e do módulo de rigidez em ensaios de fadiga em extensão controlada e em tensão controlada

Como critério de rotura, dado que este é um ensaio do tipo destrutivo, segundo a EN 12697-24:2012, caso o ensaio seja realizado em controlo de tensão, é dado por atingida quando o valor de extensão inicial duplica, enquanto que num ensaio em controlo de extensão, o critério passa por terminar o ensaio quando é registado uma redução de 50% do valor módulo de rigidez inicial da mistura, valor habitualmente lido ao ciclo 100.

A avaliação do módulo de rigidez, bem como da resistência à fadiga, para provetes prismáticos, pode ser realizada com base em ensaios de flexão em dois pontos, em três pontos ou em quatro pontos, o qual foi o efetuado no presente procedimento experimental.

Ensaio de flexão de viga em quatro pontos

O ensaio de flexão em quatro pontos (4PBT) consiste em submeter um provete prismático a um carregamento cíclico, representativo das condições de serviço a que o pavimento está sujeito ao longo do seu período de vida útil.

O carregamento efetuado é aplicado a partir de dois apoios internos, na direção vertical, perpendicularmente ao eixo longitudinal da viga de ensaio. Os dois apoios externos impedem o deslocamento vertical. Os apoios têm rotação e translação livres e estão colocados simetricamente entre si relativamente ao centro da viga, sendo que, os apoios internos estão a um terço dos apoios externos (Figura 3.13). Esta configuração contribui para que ocorra um momento constante entre os dois pontos internos e, por conseguinte, uma amplitude de extensão constante.

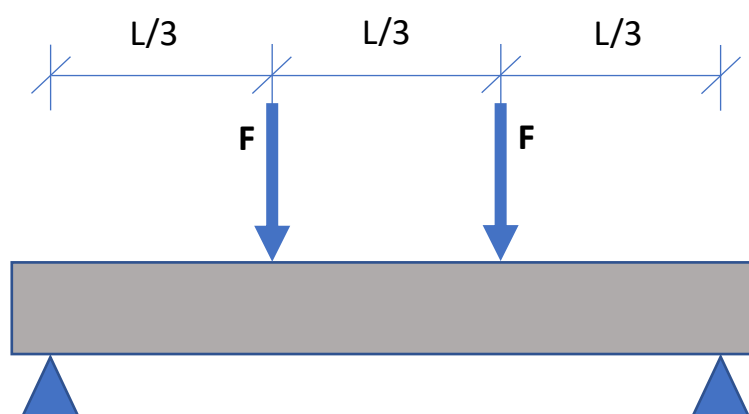


Figura 3.13 - Configuração do ensaio de quatro pontos

O equipamento utilizado neste programa experimental está representado na Figura 3.14, sendo que a sua constituição é feita por três componentes principais:

- Estrutura de carregamento composta por um braço pneumático capaz de aplicar uma carga sinusoidal através de dois apoios internos transdutores à viga de ensaio, devidamente apoiada por outros dois apoios externos;
- Câmara de controlo da temperatura de ensaio, na qual é instalada a estrutura atrás mencionada;
- Unidade de controlo e recolha de dados de ensaio para o computador. A leitura das deformações ao longo do ensaio é efetuada através de um sensor colocado no ponto central da viga, designado por *LVDT- Linear Variable Differential*

Transducer, o qual deve ser calibrado no início de cada ensaio, através da regulação de uma porca, até estar devidamente ajustado na face superior do provete, de forma a efetuar leituras com grande exatidão.



Figura 3.14 - Equipamento de ensaio de flexão em 4 pontos: (a) Disposição completa do equipamento; (b) Estrutura de carregamento

Determinação do módulo de rigidez

A determinação do módulo de rigidez das misturas betuminosas fabricadas com diferentes taxas de incorporação de microcápsulas no procedimento experimental aqui descrito foi realizada em três momentos distintos (Figura 3.1). Antes e após o processo de envelhecimento a que foram sujeitas. E após a ativação das microcápsulas e subsequente processo de regeneração da mistura betuminosa.

Este ensaio foi realizado em extensão controlada, segundo a EN 12697-26:2012, a qual preconiza que não se deve aplicar um carregamento que não provoque uma extensão superior a 50×10^{-6} m/m, de forma a que não ocorra dano por fadiga no provete. Foi feito um varrimento de frequências de acordo com o Tabela 3.4. O valor coincidente entre a primeira e a última medição do módulo de rigidez tem o propósito de aferir um possível dano no provete de ensaio. Caso a diferença de valores obtidos para essas frequências superiores a 3%, significa que ocorreu tal fenómeno e, como tal, o provete terá de ser excluído de ensaios posteriores. As condições de ensaio aplicadas na determinação do módulo de rigidez estão definidas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Parâmetros utilizados nos Ensaios de caracterização do módulo de rigidez segundo o ensaio de flexão a quatro pontos

Frequências (Hz)	Nº ciclos por frequência	Temperatura (°C)	Extensão (µm)
1; 2; 4; 8; 10; 30; 1	200	20	50

Ensaio de fadiga

As condições de ensaio escolhidas para avaliação da resistência à fadiga, têm bastante relevância, de forma a que os ensaios desenvolvidos sejam representativos do comportamento que determinada mistura betuminosa vai ter em serviço. Assim, a temperatura de ensaio foi de 20°C, sendo que o provete foi condicionado na câmara climática durante uma hora, previamente ao ensaio. Relativamente à frequência, a Norma EN 12697-24:2012 refere que pode ser aplicado um valor entre 0 e 60 Hz. No presente procedimento experimental foi escolhido o valor de 20 Hz.

Mollenhauer et al. (2009) desenvolveram um estudo sobre misturas betuminosas com um modelo à escala real, em paralelo com ensaios de fadiga com flexão em quatro pontos, no qual foram analisadas diferentes tipologias de pavimento e carregamentos, materializando, assim, as diferentes velocidades de circulação de tráfego e eixos padrão. Na Figura 3.15 está representada a relação entre a velocidade de circulação de tráfego e a frequência respetiva provocada, com base nos resultados apresentados no modelo à escala real com aqueles verificados em meio laboratorial. Foi verificado, a partir da comparação dos resultados *in situ* com os de laboratório, que a resistência à fadiga varia em função da estrutura do pavimento e da configuração dos eixos padrão dos veículos, mas que para velocidades de 80 km/h variam entre 8 e 22 Hz. No presente procedimento experimental, foi definida como frequência a aplicar o valor de 10 Hz, o que corresponde a uma velocidade de circulação de cerca de 45 hm/h.

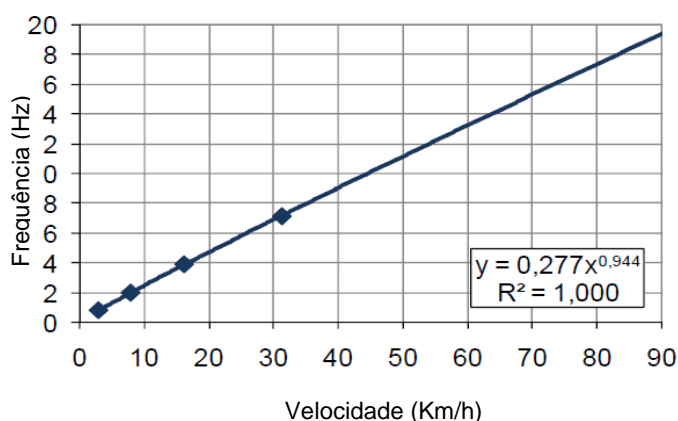


Figura 3.15 - Relação entre a velocidade de circulação do tráfego rodoviário e a frequência (Mollenhauer et al. (2009))

A Norma EN 12697-24:2012 refere que para a obtenção de uma lei de fadiga que seja representativa do comportamento da mistura betuminosa são necessários três níveis de carregamento (três níveis de tensão ou de extensão), com um mínimo de seis provetes de ensaio por nível, perfazendo, dessa forma, um total de 18 provetes. Além disso, a escolha dos níveis para o modo de carregamento (tensão ou extensão controlada) pretendido deve ser feita de modo a que a resistência à fadiga esteja num intervalo entre 10000 e 2×10^6 ciclos de carga.

Pais, J. C.; Palha, C. A. O. F. (2010) desenvolveram um estudo para aferir da necessidade de serem realizados 18 ensaios de fadiga para caracterizar a resistência à fadiga de uma mistura betuminosa, como preconizado na norma europeia, com todas as necessidades de tempo que tal acarreta. Os autores concluíram que a utilização de 3 níveis de extensão conduz à mesma lei de fadiga que a utilização do nível alto e baixo, podendo-se afirmar que o nível intermédio não acrescenta precisão à obtida com os restantes dois. Conclui-se que a obtenção de uma lei de fadiga representativa é possível com a realização de apenas dois níveis de extensão, com três provetes de ensaio por cada nível.

No procedimento experimental da presente dissertação, o ensaio de fadiga foi realizado segundo três níveis de extensão (200 μm , 400 μm e 600 μm). Nos provetes de referência, sem cápsulas, foi também realizado o nível de extensão de 100 μm .

Na Tabela 3.5 estão representados os parâmetros de ensaio utilizados nos ensaios de fadiga antes e após a ativação das cápsulas.

Tabela 3.5 - Parâmetros de ensaio dos Ensaios de resistência à fadiga segundo o ensaio de flexão a quatro pontos

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Extensão (μm)	Critério de rotura
10	20	100; 200; 400; 600	50% do E_{inicial}

A avaliação da resistência à fadiga foi realizada em dois momentos distintos (Figura 3.1). O primeiro ensaio, após o processo de envelhecimento durante 5 dias a 85°C.

Dado que o ensaio de fadiga é um ensaio do tipo destrutivo, foi efetuado um período de congelação imediatamente após este ensaio, de forma a não permitir que houvesse qualquer efeito de regeneração do betume antes da ativação das cápsulas. Assim como, a congelação efetuada após a regeneração, foi realizada de modo a que todas as vigas apresentassem exatamente o mesmo período de regeneração de 5 dias. Sendo que, as vigas que fossem testadas no segundo ensaio de fadiga tiveram um período de descongelação de 4 horas à temperatura de 20°C.

Com a comparação de resultados entre o primeiro e o segundo ensaio de fadiga pretendeu-se avaliar o efeito da regeneração da mistura.

3.3.6 – Simulação do envelhecimento em laboratório

A simulação do envelhecimento de misturas betuminosas em laboratório pode ser realizada em função da avaliação do envelhecimento desde o fabrico da mistura até ao pavimento ter arrefecido após a aplicação e compactação em obra (*Short-Term Ageing*) ou do envelhecimento a longo prazo que a mistura betuminosa sofre ao longo do seu período de vida em serviço (*Long-Term Ageing*).

Para o envelhecimento a curto prazo, o método de simulação é a colocação dos provetes em estufa a uma temperatura de 135°C durante 4 horas. Para a simulação do envelhecimento a longo prazo, o método considera a colocação em estufa a uma temperatura de 85° durante 5 dias. (Bell, C. A. et al. (1994))

No procedimento experimental, visto estar a ser avaliado o efeito regenerador da utilização das microcápsulas na mistura betuminosa, no aumento da resistência à fadiga do pavimento, foi efetuada a simulação para longo prazo (Figura 3.16).



Figura 3.16 - Simulação do envelhecimento a longo prazo da mistura betuminosa no LNEC-UPAVMAT

3.3.7 – Ativação das cápsulas

A ativação das cápsulas foi realizada no Departamento de estruturas do LNEC mediante a aplicação do carregamento em controlo de tensão nos provetes de ensaio com confinamento nas laterais (Figura 3.17). Foram aplicados vários patamares de carga até, com o auxílio de um LVDT instalado na prensa hidráulica, ser verificado uma deformação de 5 mm.

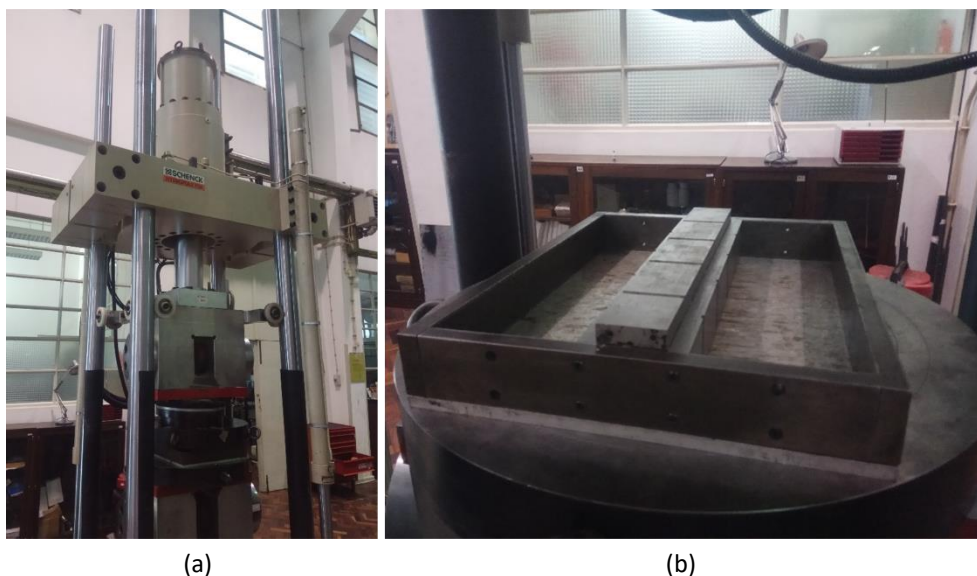


Figura 3.17 - Ativação das cápsulas: (a) Prensa hidráulica; (b) Disposição do provete de ensaio

3.3.8 – Ensaio de simulação em pista em laboratório – *Wheel tracking test*

O ensaio de simulação em pista em laboratório, conhecido internacionalmente por *wheel tracking test*, o provete de ensaio, é sujeito à acção da passagem de uma carga rolante, para simulação da passagem do tráfego rodoviário no pavimento, medindo-se, dessa forma, a redução da espessura total da camada, em função do número de ciclos de passagens provocado, a temperatura constante (Figura 3.18).

O procedimento de ensaio está preconizado segundo a EN 12697-22 (2003+A1:2007), na qual são descritos três tipos de equipamentos de ensaio, os quais variam no tipo de roda, velocidade de circulação, pressão exercida no pavimento, frequência do movimento, entre outras: equipamento de pequenas dimensões (*small size device*), existente no LNEC e que foi utilizado no presente procedimento experimental (Figura 3.18); de grandes dimensões (*large size device*) e o de extra grandes dimensões (*extra large size device*).



Figura 3.18 - Equipamento de ensaio Wheel tracking do LNEC-UPAVMAT

O presente ensaio está integrado na parte 2 do procedimento experimental deste estudo (Figura 3.1). Para a realização deste ensaio foram produzidas lajetas com as dimensões (305x305x50 mm), com posterior compactação segundo a EN 12697-33:2003+A1 e determinação das propriedades volumétricas da baridade e porosidade segundo as EN 12697-6:2012 e EN 12697-8:2003.

O ensaio tem início após o condicionamento do provete na câmara de controlo climático do equipamento durante o período de 4 horas à temperatura de ensaio, a qual varia entre 40°C e 60°C, segundo a EN 12697-22 (2003+A1:2007).

A temperatura de ensaio varia bastante o comportamento viscoelástico da mistura betuminosa e, dessa forma, o valor da deformação permanente mediante a passagem repetida do tráfego rodoviário. A maioria dos ensaios são realizados a temperaturas relativamente elevadas (50°C ou 60°C) com o propósito da redução do tempo de ensaio. Dada a proximidade com que tal gama de valores se encontra da temperatura de amolecimento do betume, pode representar uma condição bastante desfavorável para a avaliação do comportamento à deformação permanente. Assim, Freire, A. C. (2002) efetuou um estudo para a verificação da utilização desses valores ser justificável em Portugal, tendo em conta as temperaturas a que as misturas betuminosas irão estar sujeitas em condições de serviço. A autora chegou às temperaturas de ensaio recomendadas da Tabela 3.6, em função da zona climática em que está instalado o pavimento.

Tabela 3.6 - Temperaturas de ensaio propostas em Portugal para ensaio Wheel Tracking (Freire, A. C. (2002))

Zona climática	Temperatura (°C)
Zona quente	50
Zona média – Sul e zona média – Norte	45
Zona temperada	40

Contudo, a temperatura de ensaio adotada neste estudo foi de 60°C, correspondente à temperatura extrema preconizada na Norma de ensaio e a adotar segundo a NP EN 13108-1 (2011).

A análise dos valores resultantes permite a avaliação de parâmetros que avaliam a resistência à deformação permanente da mistura betuminosa. Os parâmetros determinados são:

- Taxa de deformação permanente média ao ar (*Wheel-tracking slope*):

$$WTS_{AIR} = \frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5} \quad (3.3)$$

em que:

$d_{10\,000}$ é a profundidade da rodeira após a aplicação de 10 000 ciclos de carga, expresso em mm;

$d_{5\,000}$ é a profundidade da rodeira após a aplicação de 5 000 ciclos de carga, expresso em mm;

- Percentagem de profundidade média da rodeira ao ar PRD_{AIR} (*Mean proportional rut depth in air*):

$$PRD_{AIR} = \frac{RD_{AIR}}{h} \quad (3.4)$$

em que:

$$RD_{AIR} = d_{10\,000};$$

h é a altura inicial do provete de ensaio, expresso em mm.



(a)



(b)

Figura 3.19 - Laje antes (a) e após (b) o ensaio de wheel tracking

Para avaliação do efeito regenerador das microcápsulas, este ensaio foi desenvolvido por duas vezes, tendo sido adotado como critério de paragem em ambos os ensaios, ser atingido um cavado de rodeira de 10 mm ou de 20000 ciclos de carga. O período de repouso durante 5 dias a 20°C entre os ensaios teve o objetivo de permitir a libertação do óleo das cápsulas e, assim, verificar-se o efeito de regeneração do betume, mediante a comparação do comportamento dos provetes sem a adição de microcápsulas com aqueles que a tinham na sua composição, para as duas condições de ensaio referidas (Figura 3.19).

4 – Análise e discussão de resultados

4.1 – Introdução

Neste capítulo serão descritos e analisados os resultados obtidos relativamente às propriedades volumétricas dos provetes compactados, os resultados do módulo de rigidez e os parâmetros de avaliação da resistência à fadiga e às deformações permanentes para as diferentes fases de avaliação, para avaliação do efeito da introdução do rejuvenescedor encapsulado em estudo, na mistura betuminosa.

4.2- Propriedades volumétricas dos provetes

Os valores da porosidade e da baridade dos provetes utilizados no procedimento experimental estão descritos nas Tabelas 4.1 e 4.2. Relativamente aos resultados apresentados, ocorre uma diminuição da baridade, em função da crescente dosagem de microcápsulas aplicada, contrariamente à porosidade, a qual tem um aumento.

Os resultados obtidos para cada um dos provetes utilizados, encontram-se descritos no Anexo A.

Para os provetes prismáticos utilizados na parte I do procedimento experimental ocorre uma diminuição da baridade, em função do incremento da dosagem de microcápsulas aplicada, de acordo com a baridade máxima teórica calculada, contrariamente à porosidade, a qual apresenta um aumento. Para os provetes de referência (sem cápsulas), 0,5%, 0,75% e 1%, o valor foi de 2432,9 kg/m³, 2422,5 kg/m³, 2415,5 kg/m³ e 2390,2 kg/m³, respetivamente. A porosidade apresentou valores entre 4,4% e 5,1% (Tabela 4.1).

Para as lajetas utilizadas na parte II do procedimento experimental, para o estudo da resistência à deformação permanente, a baridade também apresentou valores decrescentes com o aumento da dosagem de microcápsulas. A porosidade apresentou valores entre 4,4% e 5,0% (Tabela 4.2).

Tabela 4.1 - Valores de baridade e porosidade dos provetes prismáticos ensaiados na parte I do procedimento experimental

Propriedades	Baridade (Kg/m ³)		Porosidade (%)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Sem Cápsulas (Condição de referência)	2432,9	14,7	4,6	0,6
0,5 %	2422,5	6,0	4,4	0,2
0,75 %	2415,5	9,2	4,4	0,4
1 %	2390,2	19,1	5,1	0,8

Tabela 4.2 - Valores de baridade e porosidade das lajetas de ensaio utilizadas na parte II do procedimento experimental

Propriedades	Baridade (Kg/m ³)		Porosidade (%)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Sem Cápsulas (Condição de referência)	2435,1	-	4,5	-
0,5 %	2422,2	-	4,4	-
0,75 %	2400,0	-	5,0	-
1 %	2402,8	-	4,6	-

4.3 Efeito do envelhecimento no Módulo de rigidez e no Ângulo de fase

No estado inicial, na fase pós fabrico (Figura 4.1), o módulo de rigidez apresentou variações entre as dosagens de microcápsulas aplicadas ao longo das diferentes frequências de ensaio. De uma forma geral, os provetes de referência (sem cápsulas) apresentaram os maiores valores de rigidez. Já os provetes com a maior dosagem aplicada de microcápsulas (1%), apresentaram os menores valores deste parâmetro, sendo que apresentaram uma gama de valores semelhante com os provetes de 0,5%, o que pode ser justificado com o maior valor de porosidade apresentado. Os provetes de 0,75% foram o segundo valor mais elevado ao longo de todas as frequências. Deve notar-se que, de acordo com os valores apresentados de módulo

de rigidez na repetição da frequência de 1 Hz, há uma semelhança de valores relativamente à primeira medição, o que é revelador de que não ocorreu dano nas amostras em ensaio, ao longo do varrimento de frequências do ensaio.

O ângulo de fase é um parâmetro de medida do desfasamento entre as tensões e as deformações ocorridas, permitindo inferir o comportamento de uma mistura betuminosa, se é predominantemente elástico (ângulo de fase nulo) ou viscoso. Na Figura 4.2, é possível verificar que, na fase pós fabrico, o ângulo de fase diminui com o aumento da frequência, contrariamente ao módulo de rigidez, havendo uma relação inversa entre estes dois parâmetros.

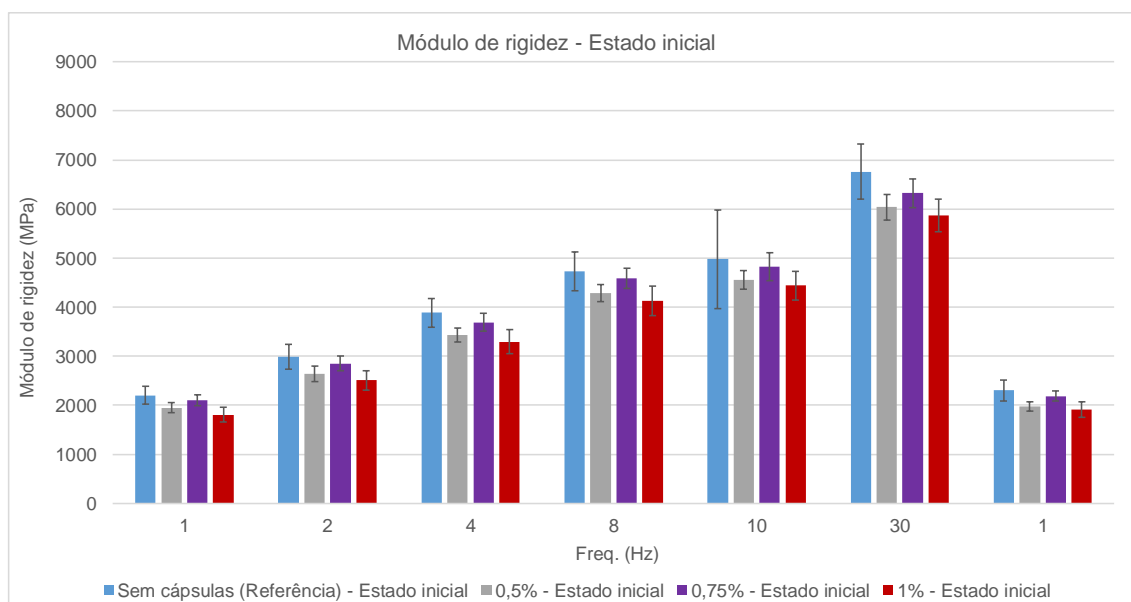


Figura 4.1 - Módulo de rigidez obtido no varrimento de frequências no estado inicial da mistura betuminosas com as diferentes dosagens de microcápsulas aplicadas

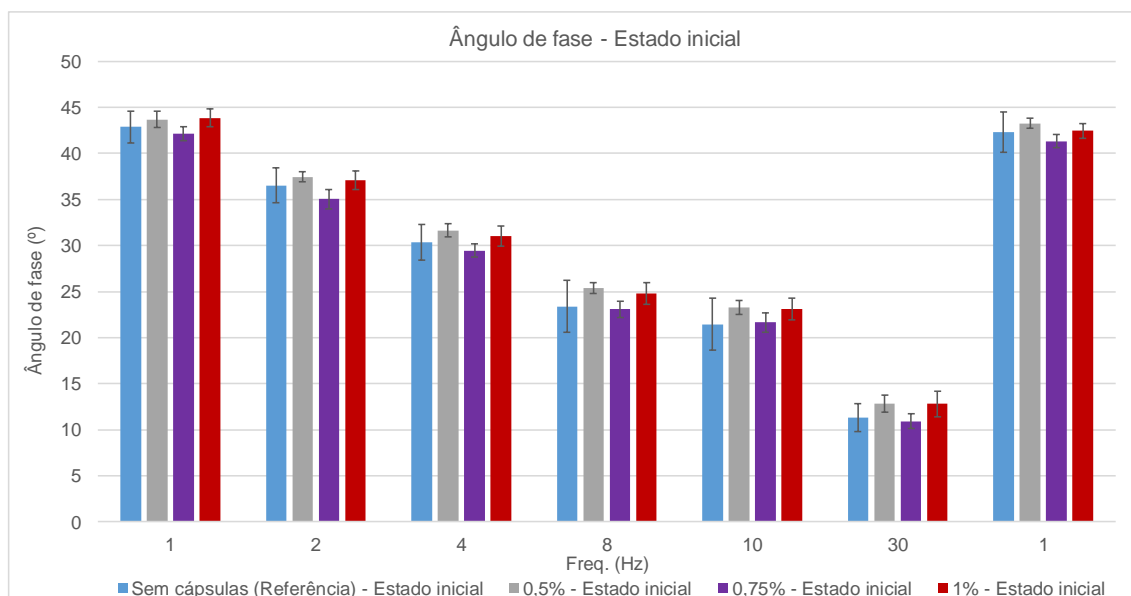


Figura 4.2 - Ângulo de fase obtido no varrimento de frequências no estado inicial da mistura betuminosas com as diferentes dosagens de microcápsulas aplicadas

Na fase de pós envelhecimento, o efeito da aplicação das diferentes dosagens de microcápsulas torna-se mais evidente, sendo que, os provetes apresentaram valores de rigidez em ordem decrescente com o aumento da dosagem de microcápsulas ao longo do varrimento de frequências (Figura 4.3). Ademais, como seria de esperar, ocorre um aumento da rigidez em todas as dosagens de microcápsulas face à fase de pré envelhecimento, em linha com estudos anteriores, referentes ao comprovado aumento da rigidez de misturas betuminosas com o envelhecimento (Tangella, S. R. et. al (1990)). Tal, é justificado com o aumento da viscosidade do betume e menor flexibilidade com o envelhecimento provocado em laboratório (Paul, D. K. et al. (2016)).

Na Tabela 4.3 estão descritas as percentagens de aumento da rigidez para cada uma das dosagens aplicadas, em que a adição de 0,75% e 1% de microcápsulas contribuíram para um menor aumento da rigidez, face ao registado nos provetes de referência. No entanto, a maior percentagem de aumento foi verificada na dosagem de 0,5%.

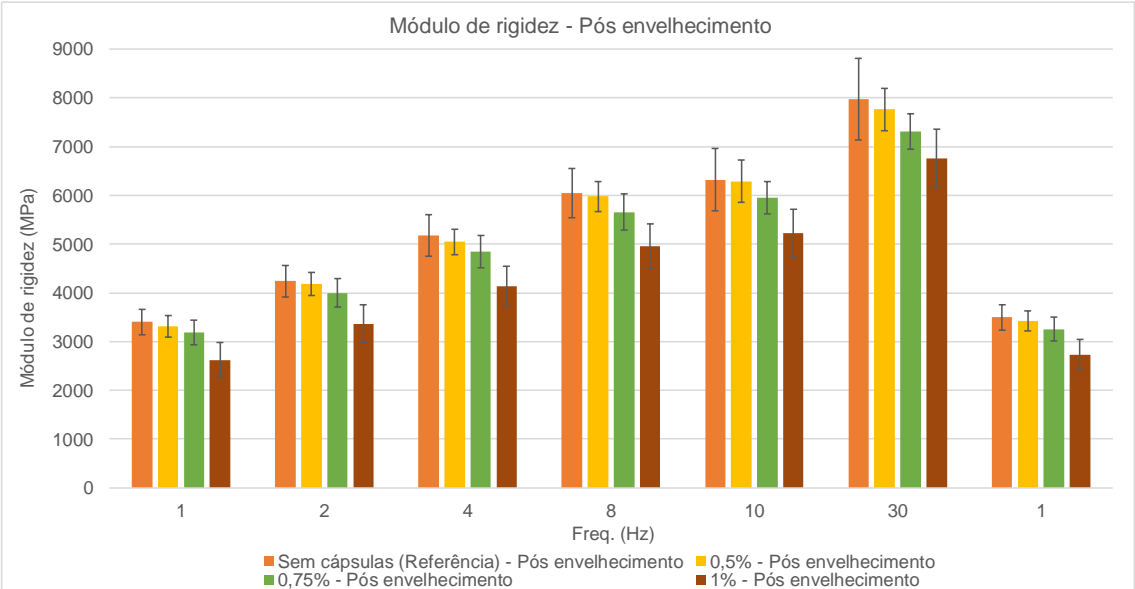


Figura 4.3 - Módulo de rigidez apresentado no varrimento de frequências na fase de pós envelhecimento da mistura betuminosas com as diferentes dosagens de microcápsulas aplicadas

Tabela 4.3 – Variação do módulo de rigidez com a fase de envelhecimento

Dosagem \ Freq. (Hz)	1	2	4	8	10	30	1	Valor médio
Sem Cápsulas (Referência)	+55%	+42%	+33%	+28%	+27%	+18%	+52%	+36%
0,50%	+70%	+59%	+47%	+39%	+38%	+31%	+73%	+51%
0,75%	+52%	+40%	+31%	+23%	+23%	+16%	+49%	+33%
1%	+45%	+34%	+26%	+20%	+18%	+15%	+43%	+29%

Na Figura 4.4 está apresentado o valor do ângulo de fase nas diversas frequências de ensaio, nas quatro dosagens de cápsulas, na fase de pós envelhecimento. É possível verificar que, ocorre um comportamento inverso ao do módulo de rigidez, com o envelhecimento imposto, havendo uma diminuição genérica deste parâmetro, nas dosagens em estudo (Tabela 4.4).

No Anexo C são apresentados os valores do módulo de rigidez e do ângulo de fase de cada provete de ensaio.

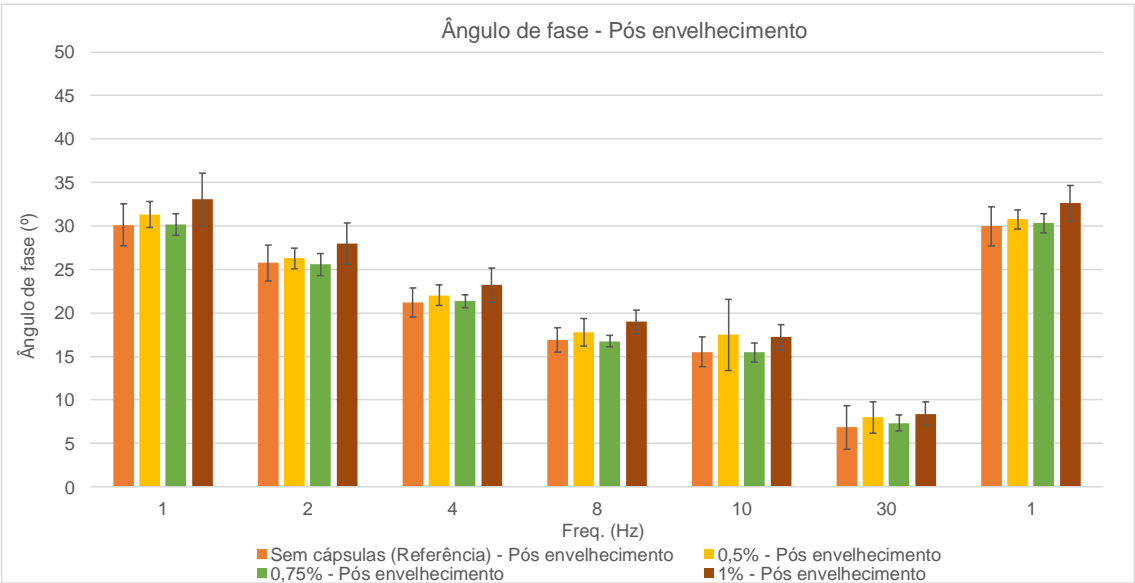


Figura 4.4 - Ângulo de fase apresentado no varrimento de frequências na fase de pós envelhecimento da mistura betuminosas com as diferentes dosagens de microcápsulas aplicadas

Tabela 4.4 - Variação do ângulo de fase com a fase de envelhecimento

Dosagem \ Freq. (Hz)	1	2	4	8	10	30	1	Valor médio
Sem Cápsulas (Referência)	-30%	-30%	-30%	-28%	-28%	-40%	-29%	-31%
0,50%	-28%	-30%	-30%	-30%	-25%	-38%	-29%	-30%
0,75%	-28%	-27%	-28%	-27%	-29%	-33%	-27%	-28%
1%	-25%	-25%	-25%	-24%	-25%	-34%	-23%	-26%

4.4 Resistência à fadiga inicial

Nas Figuras 4.5 a 4.8 estão representadas as curvas de evolução do módulo de rigidez e do ângulo de fase para os três níveis de extensão aplicados nas quatro dosagens de cápsulas no primeiro ensaio de fadiga. É possível verificar que ocorre um comportamento semelhante nas quatro dosagens para os dois parâmetros, em que, à medida que ocorre um aumento do nível de extensão aplicado, o módulo de rigidez decresce mais rapidamente, indicando uma menor vida à fadiga. Relativamente ao ângulo de fase, a evolução é mais instável, aumentando de forma mais acentuada, com o aumento do nível de extensão aplicado.

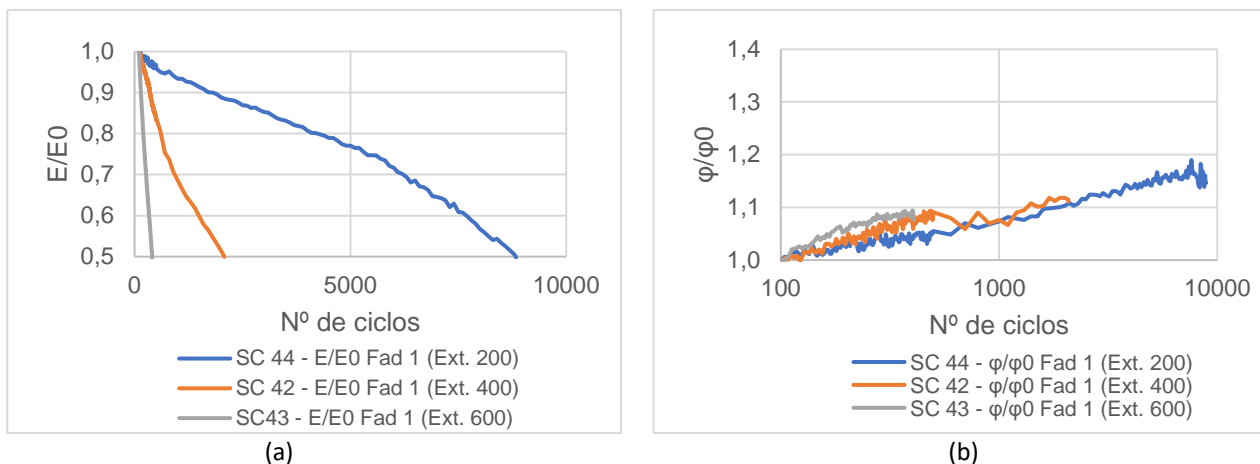


Figura 4.5 - Evolução do módulo de rigidez (a) e do ângulo de fase (b) relativamente ao ciclo #100 para os as extensões de 200 μ m, 400 μ m e 600 μ m dos provetes sem cápsulas

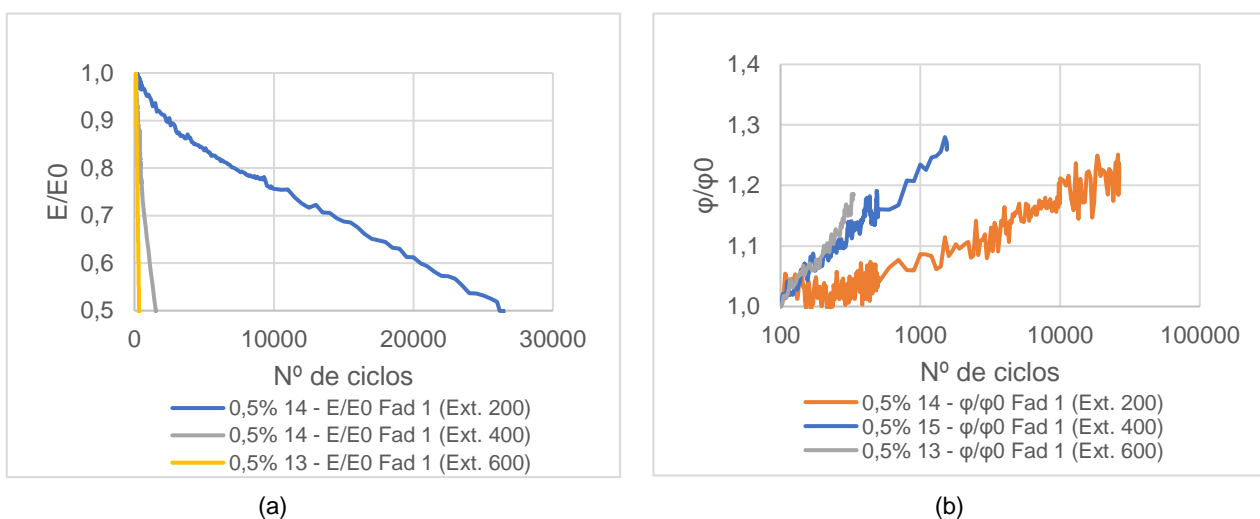


Figura 4.6 - Evolução do módulo de rigidez (a) e do ângulo de fase (b) relativamente ao ciclo #100 para as extensões de 200 μ m, 400 μ m e 600 μ m dos provetes com a dosagem de 0,5%

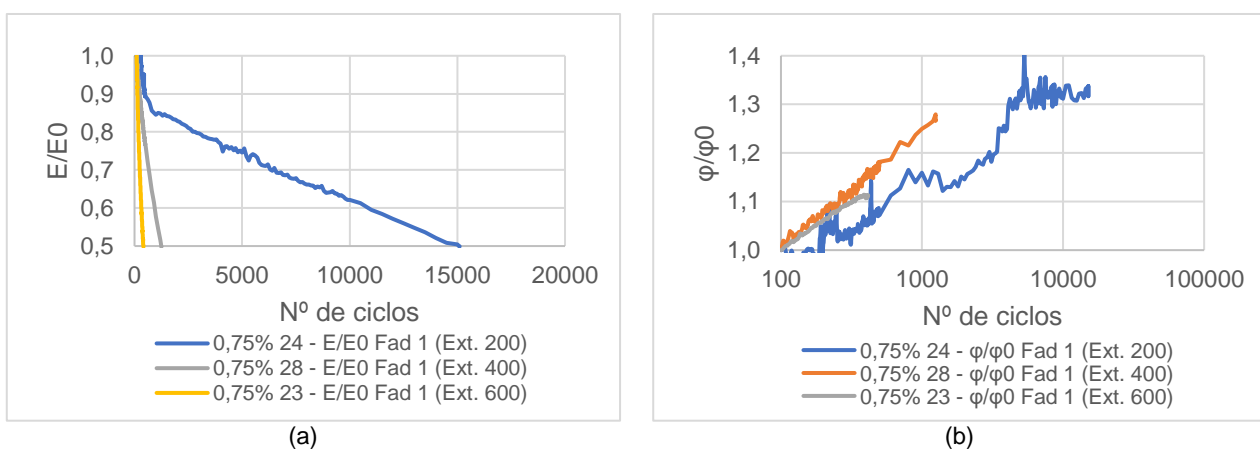


Figura 4.7 - Evolução do módulo de rigidez (a) e do ângulo de fase (b) relativamente ao ciclo #100 para as extensões de 200 μ m, 400 μ m e 600 μ m dos provetes com a dosagem de 0,75%

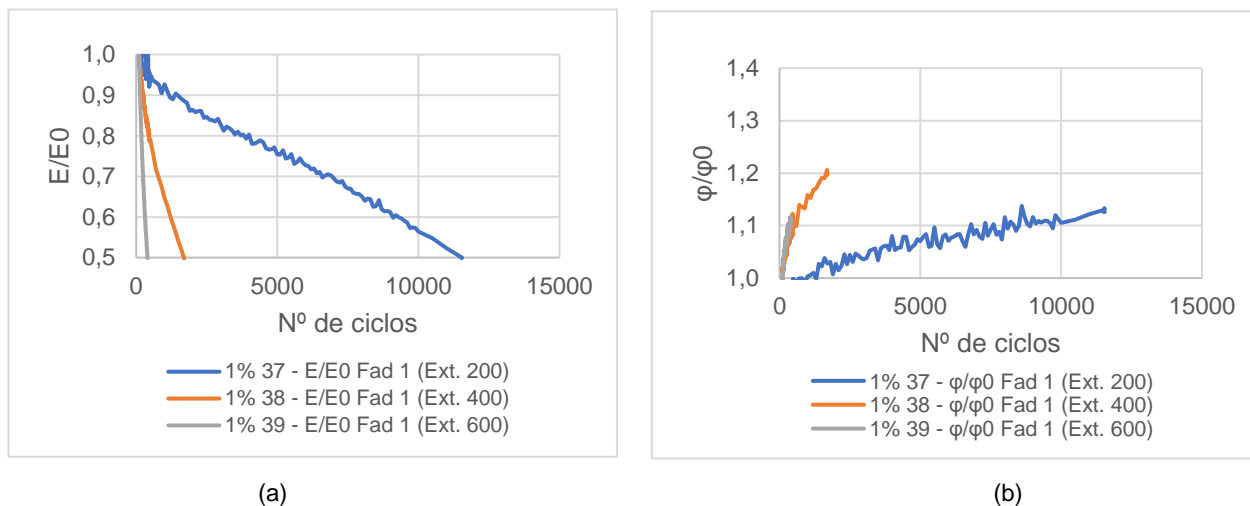


Figura 4.8 - Evolução do módulo de rigidez (a) e do ângulo de fase (b) relativamente ao ciclo #100 para os as extensões de 200μm, 400μm e 600μm dos provetes com a dosagem de 1%

A. Leis de fadiga

A resistência à fadiga apresentou um comportamento semelhante para as quatro dosagens de cápsulas (Figura 4.9), não se verificando um efeito evidente resultante da adição de cápsulas à mistura betuminosa. A resistência à fadiga de cada provete testado encontra-se no Anexo B. No entanto, a dosagem de referência apresenta uma lei de fadiga com um coeficiente de correlação inferior ao que é apresentado pelas leis referentes às dosagens com cápsulas, o que significa que a lei das sem cápsulas é menos bem ajustada aos valores medidos experimentalmente.

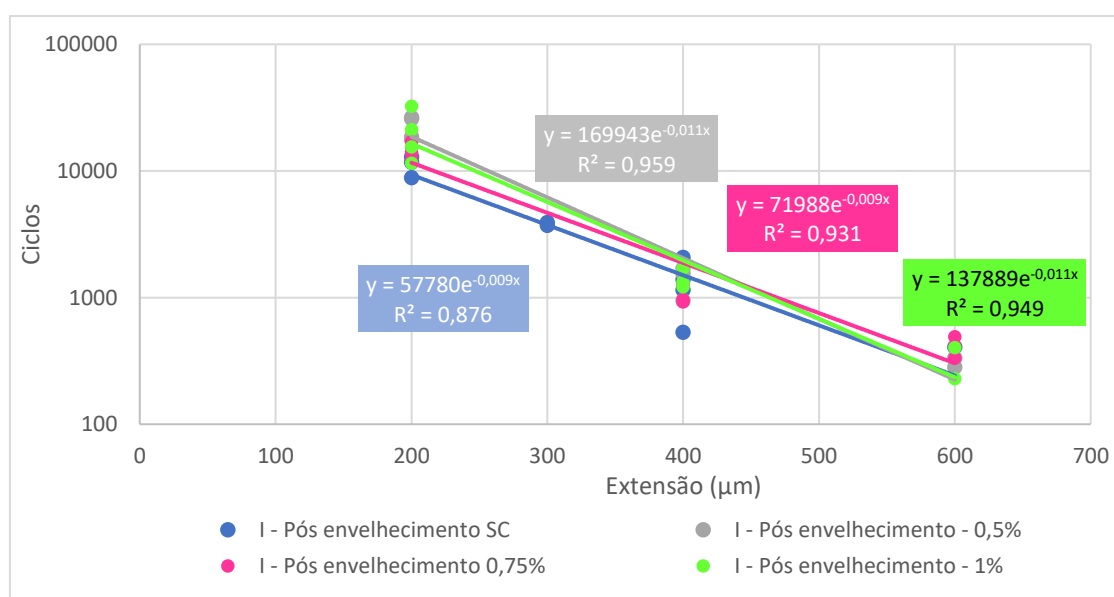


Figura 4.9 - Leis de fadiga do primeiro ensaio para as quatro dosagens de cápsulas

B. Energia dissipada

A energia dissipada é considerada um parâmetro de avaliação do dano por fadiga, em que determinados materiais com semelhantes classes viscoelásticas partilham leis de dissipação de energia dissipada semelhantes, de forma a manter um balanço energético com o desenvolvimento de dano por fadiga, quando sujeitos a determinada ação externa. Assim, foi analisado o valor da variação da energia dissipada correspondente a uma redução de 50% do módulo de rigidez inicial do material e ao número de ciclos final (*PV- Plateau Value*), em cada provete. Desta forma, a partir do valor *PV* de cada provete, foi possível definir quatro leis de energia dissipada correspondente às quatro dosagens de cápsulas utilizadas (Figura 4.10).

Relativamente a este parâmetro, é verificado que não existe praticamente diferença entre as quatro dosagens aplicadas. Shen, S., Airey, G. D. et. al (2006) referem que o tipo de betume e a quantidade de agregados utilizados têm uma grande influência na energia dissipada de uma mistura betuminosa, uma vez que contribuem para um aumento do teor de vazios numa mistura, resultando em um maior número de superfícies de descontinuidade entre o betume e os agregados, contribuindo para maiores fontes de energia dissipada.

Atendendo a que o betume foi o mesmo nas quatro dosagens, de que não existem grandes diferenças no valor da porosidade (Tabela 4.1) e de que no primeiro ensaio de fadiga, ainda não ter sido provocada a libertação do óleo das cápsulas introduzidas, pode ser, assim, justificada a reduzida diferença entre as dosagens.

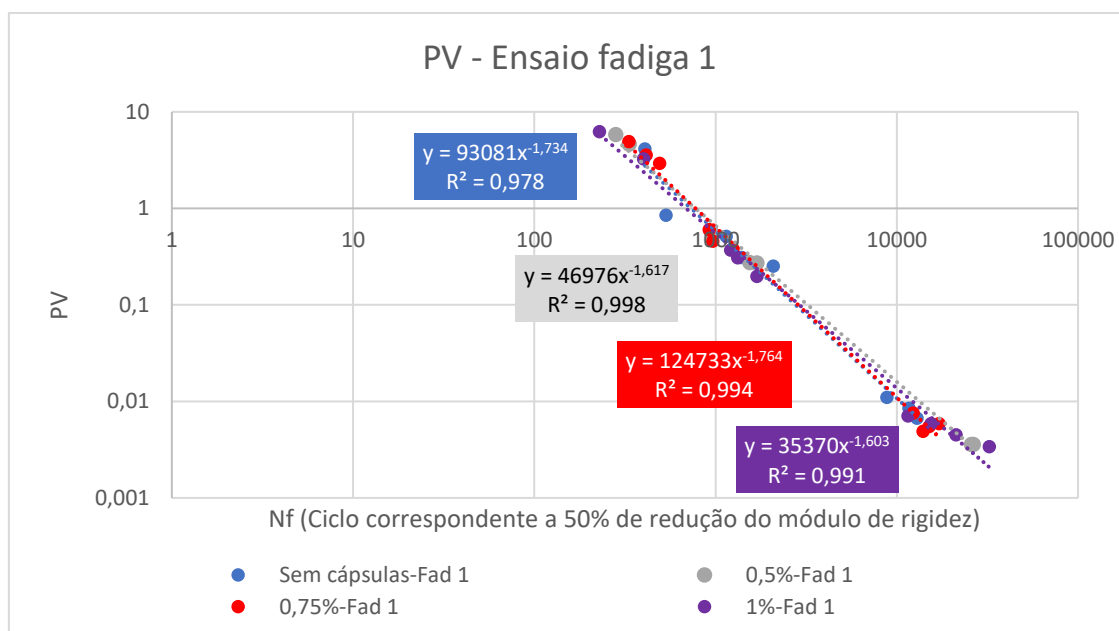


Figura 4.10 - Curvas PV- Nf para as quatro dosagens de cápsulas no ensaio de fadiga 1

4.5 – Efeito da solicitação das cápsulas e do período de repouso

4.5.1- Módulo de rigidez e ângulo de fase

Na fase de pós carregamento e de período de repouso, a diferença no módulo de rigidez dos provetes de referência relativamente àqueles que têm microcápsulas na sua constituição é evidenciada (Figura 4.11) em todas as frequências de ensaio face à fase anterior de avaliação deste parâmetro, no pós envelhecimento (Figura 4.3).

A diminuição do módulo de rigidez constata a regeneração ocorrida nos provetes, uma vez que ocorreu uma diminuição no módulo de rigidez. Também é possível verificar a menor variação ocorrida nos provetes sem microcápsulas na sua constituição, relativamente às restantes dosagens (Tabela 4.5), o que pode constatar o maior efeito da adição de microcápsulas durante o período de repouso pois, ocorrem diminuições na rigidez nos provetes com cápsulas entre 40% a 50% superiores relativamente aos sem cápsulas. Tal, revela que o óleo das cápsulas foi libertado, provocando a diminuição da viscosidade do betume.

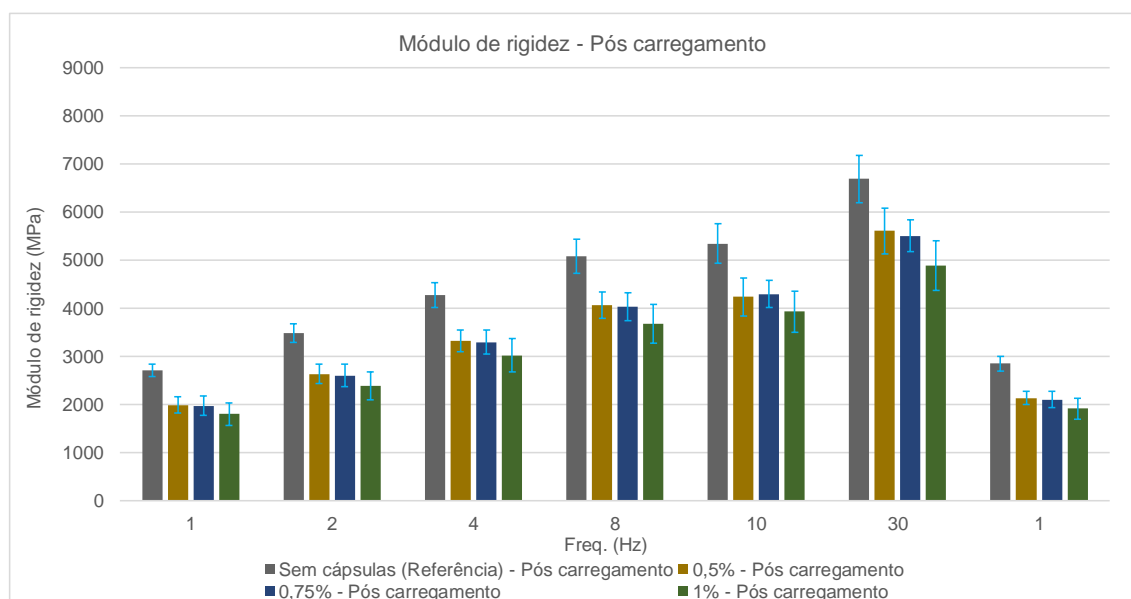


Figura 4.11 - Módulo de rigidez apresentado no varrimento de frequências na fase de pós carregamento da mistura betuminosas com as diferentes dosagens de microcápsulas aplicadas

Tabela 4.5 - Variação do módulo de rigidez com a fase de carregamento e período de repouso

Dosagem \ Freq. (Hz)	1	2	4	8	10	30	1	Valor médio
Sem Cápsulas (Referência)	-20%	-18%	-18%	-16%	-16%	-16%	-19%	-17%
0,50%	-40%	-37%	-34%	-32%	-33%	-29%	-38%	-35%
0,75%	-38%	-35%	-32%	-29%	-28%	-25%	-35%	-32%
1%	-32%	-29%	-27%	-26%	-25%	-28%	-30%	-28%

Na fase de pós carregamento e posterior período de repouso, o ângulo de fase (Figura 4.12) apresentou um aumento nas quatro dosagens. À semelhança do que ocorreu com o módulo de rigidez, a diferença dos provetes com cápsulas relativamente aos de referência é evidenciada (Tabela 4.6). Sendo que, as dosagens de 0,5% e 0,75% apresentaram também os melhores valores, pois, ao ocorrer um aumento no ângulo de fase, a mistura betuminosa diminui a sua viscosidade.

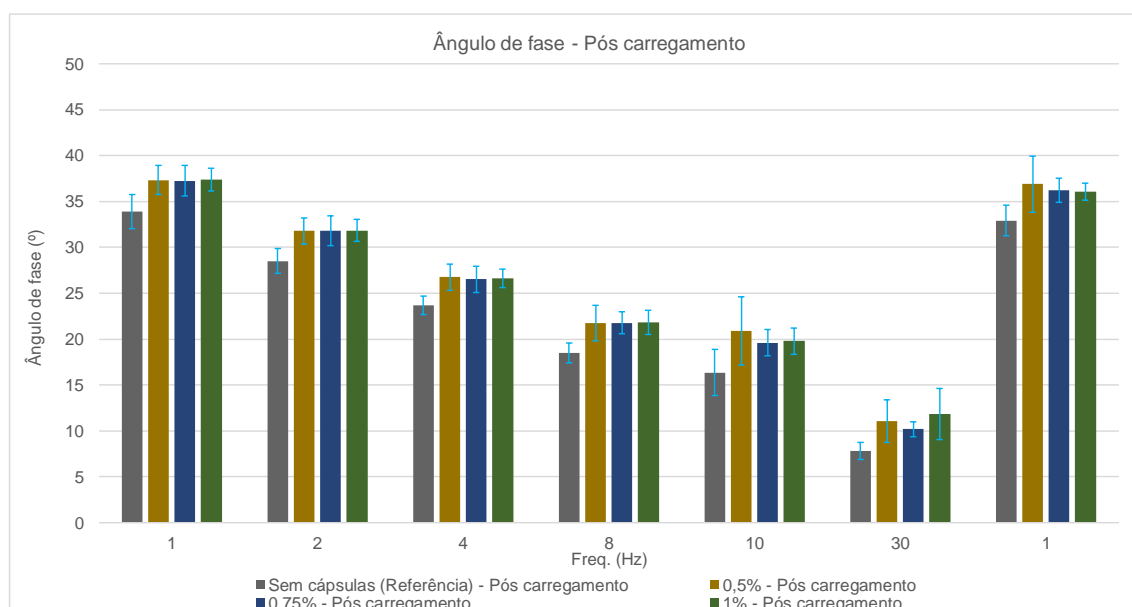


Figura 4.12- Ângulo de fase apresentado no varrimento de frequências na fase de pós carregamento da mistura betuminosas com as diferentes dosagens de microcápsulas aplicadas

Tabela 4.6 – Variação do ângulo de fase com a fase de carregamento e período de repouso

Dosagem \ Freq. (Hz)	1	2	4	8	10	30	1	Valor médio
Sem Cápsulas (Referência)	+13%	+11%	+12%	+10%	+6%	+14%	+10%	+11%
0,50%	+19%	+21%	+22%	+22%	+19%	+39%	+20%	+23%
0,75%	+23%	+24%	+24%	+30%	+27%	+39%	+20%	+27%
1%	+13%	+14%	+15%	+15%	+15%	+41%	+11%	+18%

4.5.2- Resistência à fadiga

A. Leis de fadiga

Relativamente à resistência à fadiga no segundo ensaio, as diferenças apresentadas entre as quatro dosagens são praticamente nulas (Figura 4.13). Verifica-se que após o primeiro ensaio de fadiga, subsequente carregamento para libertação do óleo e período de repouso, para regeneração da mistura betuminosa, o efeito regenerador da adição das microcápsulas não foi identificado.

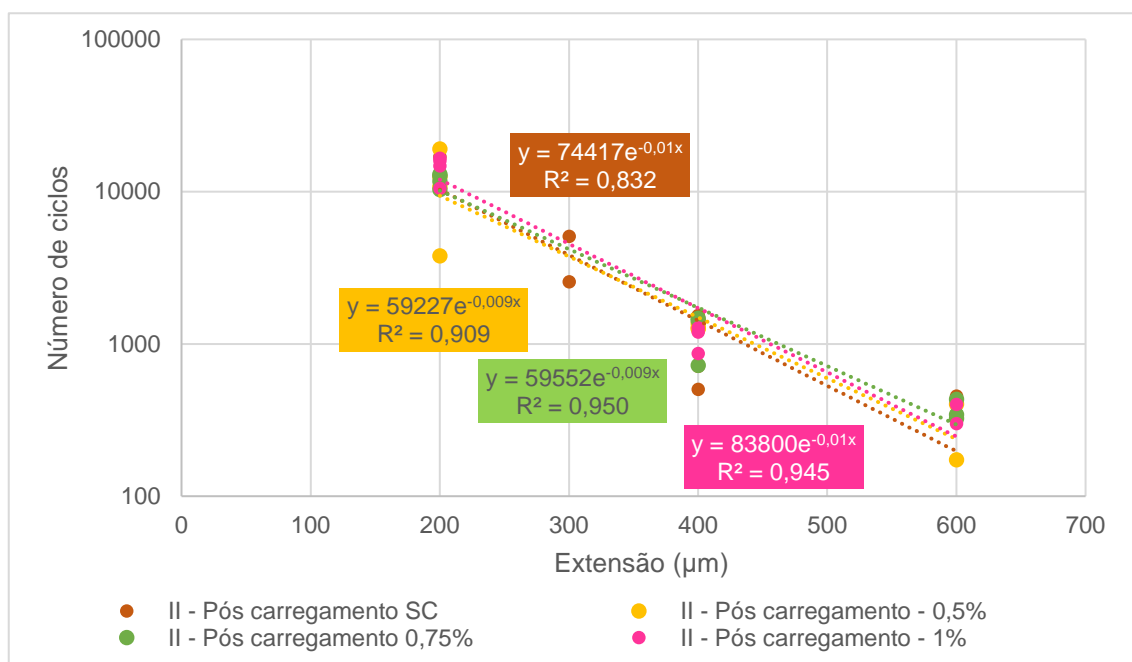


Figura 4.13 - Leis de fadiga do ensaio pós carregamento e regeneração para as quatro dosagens de cápsulas

Comparativamente com o número de ciclos atingido no primeiro ensaio de fadiga, em valores médios, foram verificadas diminuições na resistência à fadiga nos provetes com cápsulas (Tabela 4.7). No Anexo B são apresentados os resultados do número de ciclos atingido de todos os provetes em ambos os Ensaio de Fadiga. A análise comparativa das leis de fadiga do primeiro com as do segundo ensaio permite verificar que em todas as dosagens as diferenças são residuais (Figuras 4.14 a 4.17).

Tabela 4.7 - Comparação da resistência à fadiga do primeiro para o segundo ensaio

Dosagem	Resistência à fadiga do segundo ensaio relativamente ao primeiro
Sem cápsulas (Referência)	7,8%
0,50%	-24,1%
0,75%	-5,4%
1%	-13,4%

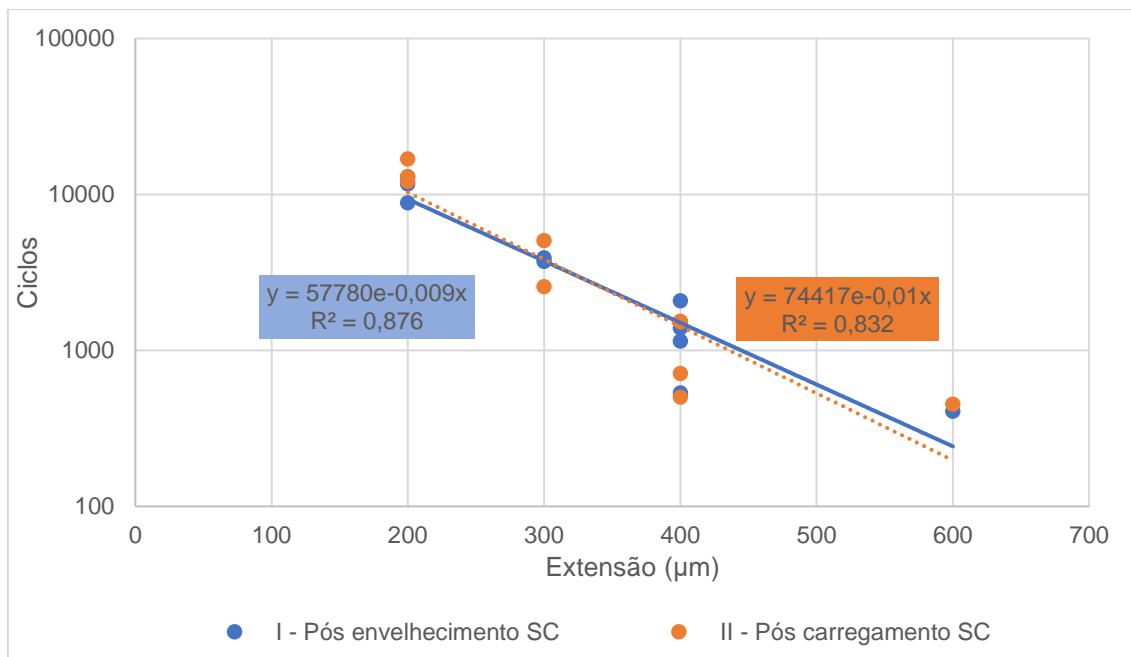


Figura 4.14 - Comparação das leis de fadiga do primeiro e do segundo ensaio para os provetes sem cápsulas

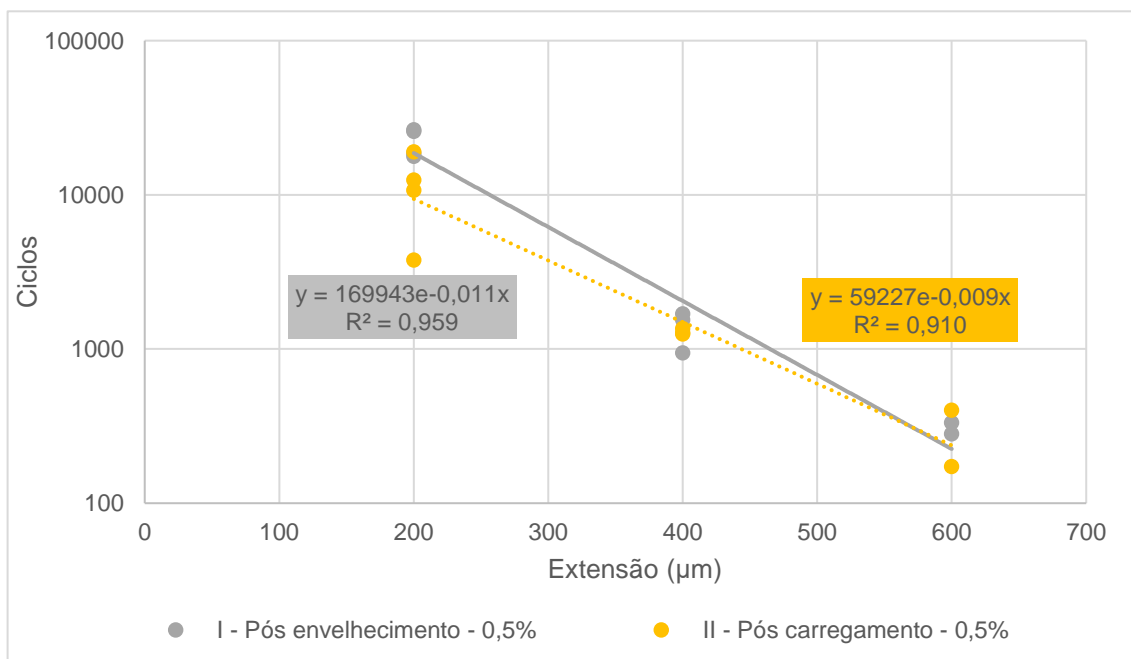


Figura 4.15 - Comparação das leis de fadiga do primeiro e do segundo ensaio para os provetes com a dosagem de 0,5%

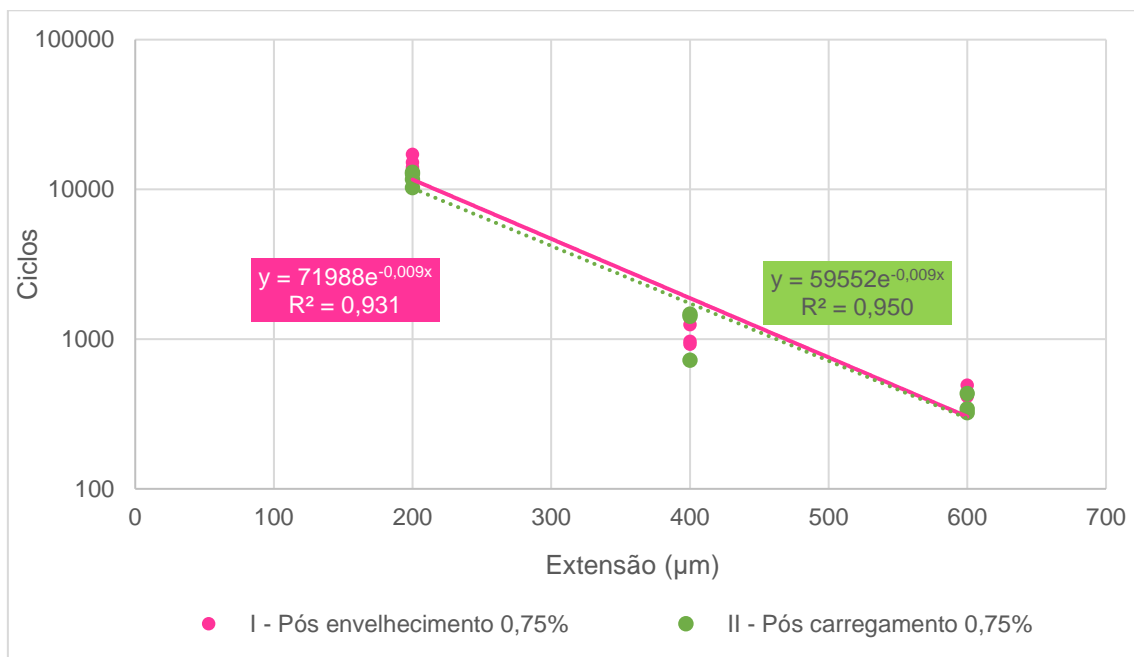


Figura 4.16 - Comparação das leis de fadiga do primeiro e do segundo ensaio para os provetes com a dosagem de 0,75%

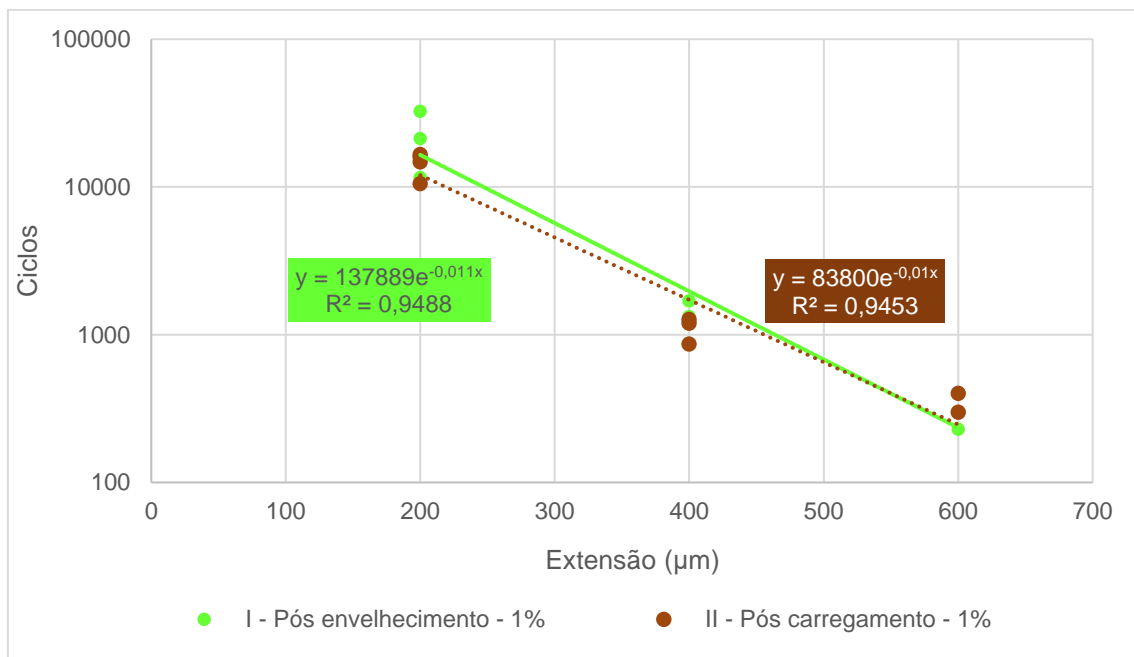


Figura 4.17 - Comparação das leis de fadiga do primeiro e do segundo ensaio para os provetes com a dosagem de 1%

Atendendo a que a lei de fadiga de uma mistura betuminosa assume a forma da seguinte equação:

$$N = A * e^{-B*\varepsilon} \quad (4.1)$$

Em que: A e B são coeficientes determinados experimentalmente;

ε é a extensão de tração

Se forem utilizadas as leis de fadiga, definidas experimentalmente para os dois ensaios de resistência à fadiga, para a extensão intermédia de 400 μ m (Tabela 4.8), verifica-se que ocorre uma diminuição generalizada da resistência à fadiga do primeiro para o segundo ensaio. Note-se que a dosagem de referência apresentou a menor diminuição neste nível de extensão.

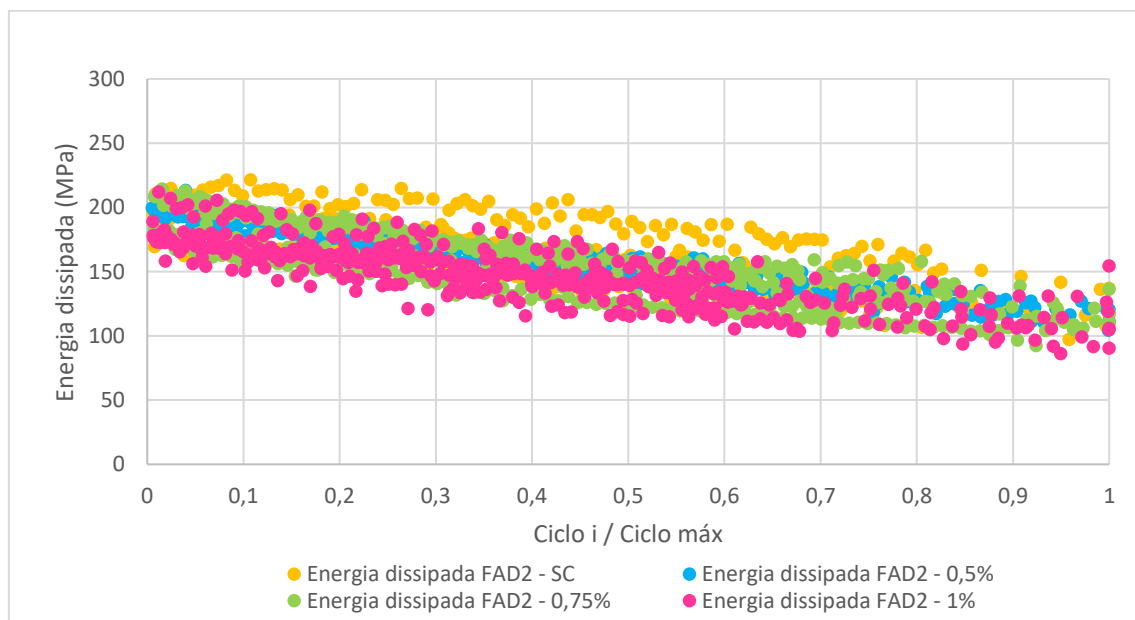
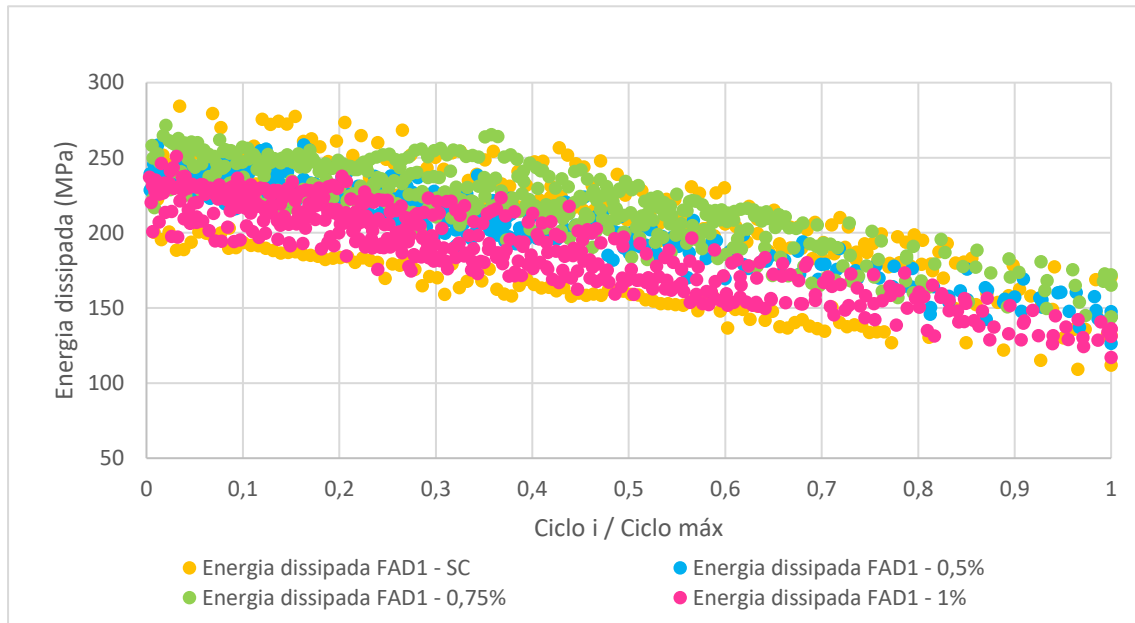
Tabela 4.8 - Resistência à fadiga para a extensão de 400 μ m

Dosagem		SC	0,5%	0,75%	1%
Fadiga 1	A	57780	169943	71988	137889
	B	-0,009122	-0,011046	-0,009116	-0,010626
	Ni 400	1504	2048	1878	1966
Fadiga 2	A	74417	59226	59551	83800
	B	-0,009887	-0,009199	-0,008844	-0,009715
	Nf 400	1419	1494	1763	1731
Variação		-5,2%	-27,0%	-7,8%	-12,5%

B. Energia dissipada

Nas Figuras 4.18 a 4.23 está representada a energia dissipada ao longo dos 2 ensaios de fadiga para os três níveis de extensão aplicados, de 200 μ m, 400 μ m e 600 μ m, ao longo dos ciclos de carregamento. Foi analisado o comportamento, relacionando o ciclo de carregamento relativamente ao ciclo máximo de cada provete de ensaio, de forma a possibilitar a comparação entre as quatro dosagens num intervalo normalizado entre zero e um. Assim, é possível verificar que a energia dissipada entre cada ciclo de carregamento é mais acentuada, à medida que ocorre um aumento da extensão aplicada, o que contribui para uma resistência à fadiga menor. Do primeiro para o segundo ensaio de fadiga, para o mesmo nível de extensão, a energia dissipada diminui, em geral para as quatro dosagens estudadas, o que pode corresponder ao dano por fadiga acumulado do primeiro ensaio, contribuindo para uma menor energia dissipada ao longo do segundo ensaio de fadiga.

É também possível verificar a maior densidade de valores correspondentes à dosagem de 1% na zona inferior dos gráficos, o que corresponde assim a um menor valor de energia dissipada desta dosagem relativamente às restantes dosagens, pondo assim em evidência a maior resistência à fadiga.



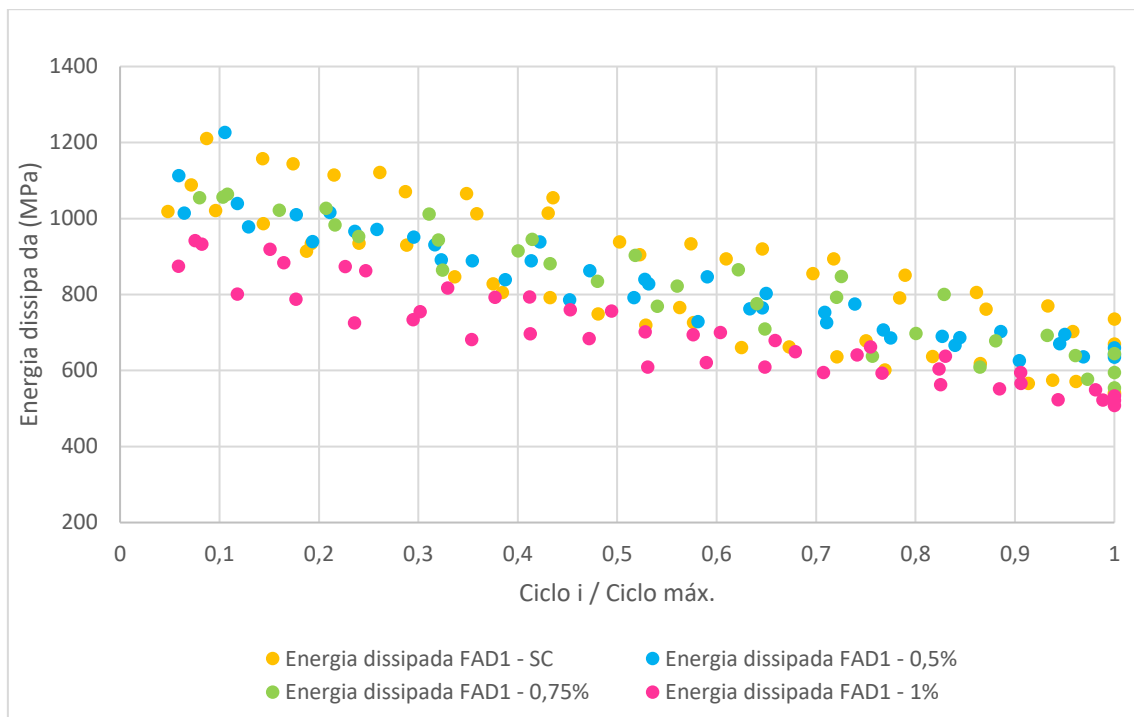


Figura 4.20 - Evolução da energia dissipada no ensaio de fadiga 2 para a extensão de 400µm

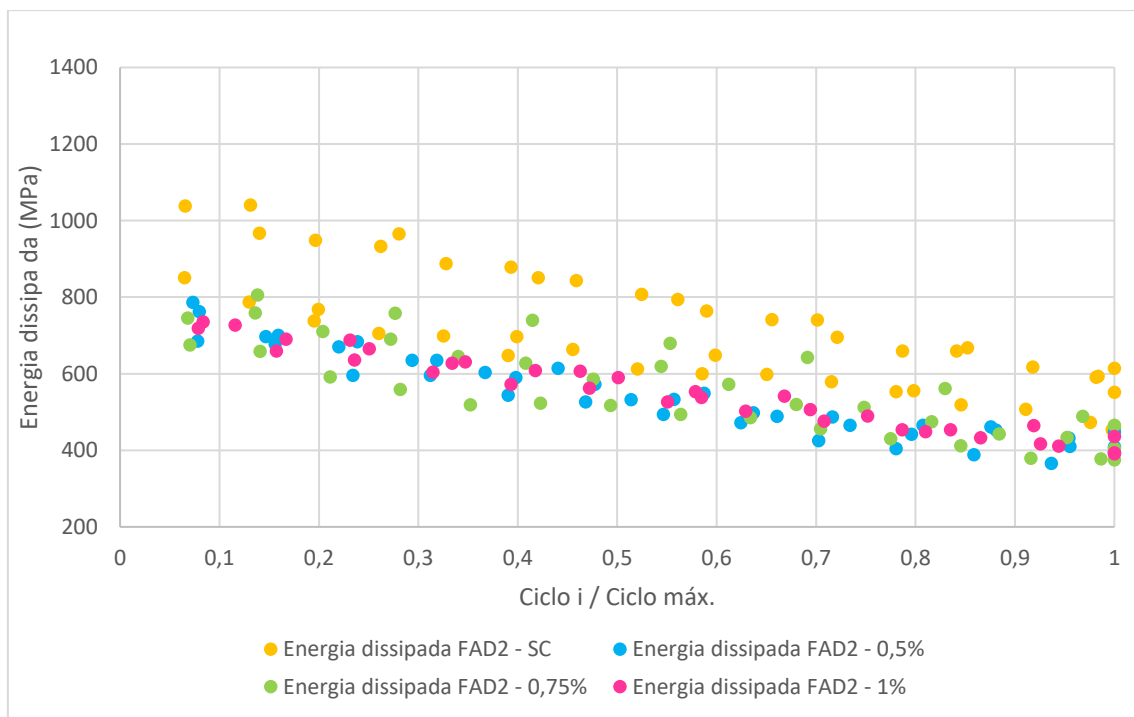


Figura 4.21 - Evolução da energia dissipada no ensaio de fadiga 2 para a extensão de 400µm

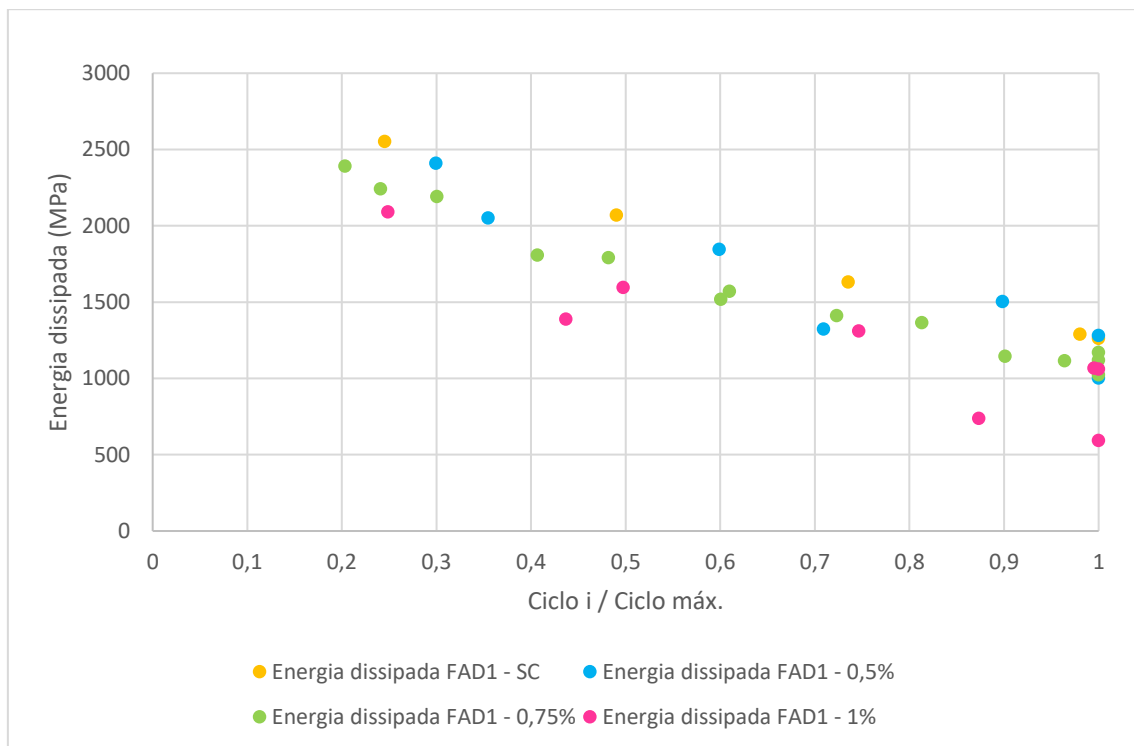


Figura 4.22 - Evolução da energia dissipada no ensaio de fadiga 1 para a extensão de 600µm

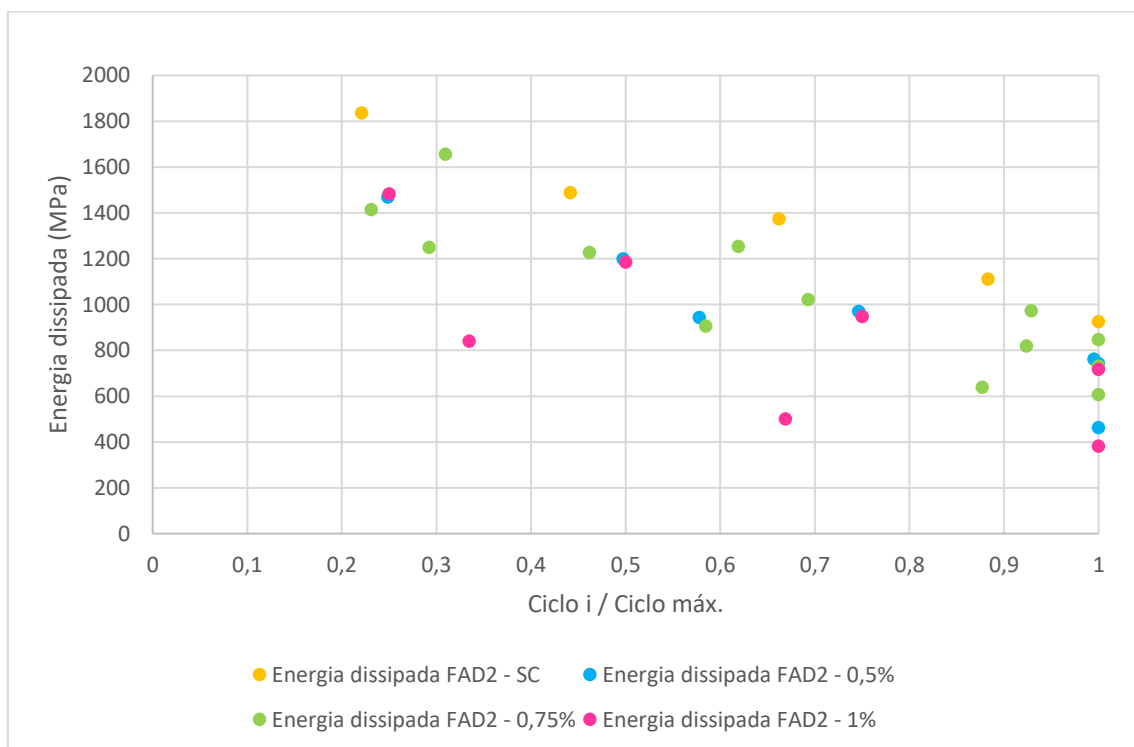


Figura 4.23 - Evolução da energia dissipada no ensaio de fadiga 2 para a extensão de 600µm

Na Figura 4.24, estão representadas as funções que representam o valor de patamar (*Plateau value*) de cada dosagem, no segundo ensaio de fadiga (após a solicitação das cápsulas e do posterior período de repouso), as quais foram determinadas em função da curva da energia dissipada de cada provete e, por sua vez, de cada dosagem de microcápsulas aplicada. É possível verificar que não ocorre praticamente diferença nenhuma entre as quatro dosagens.

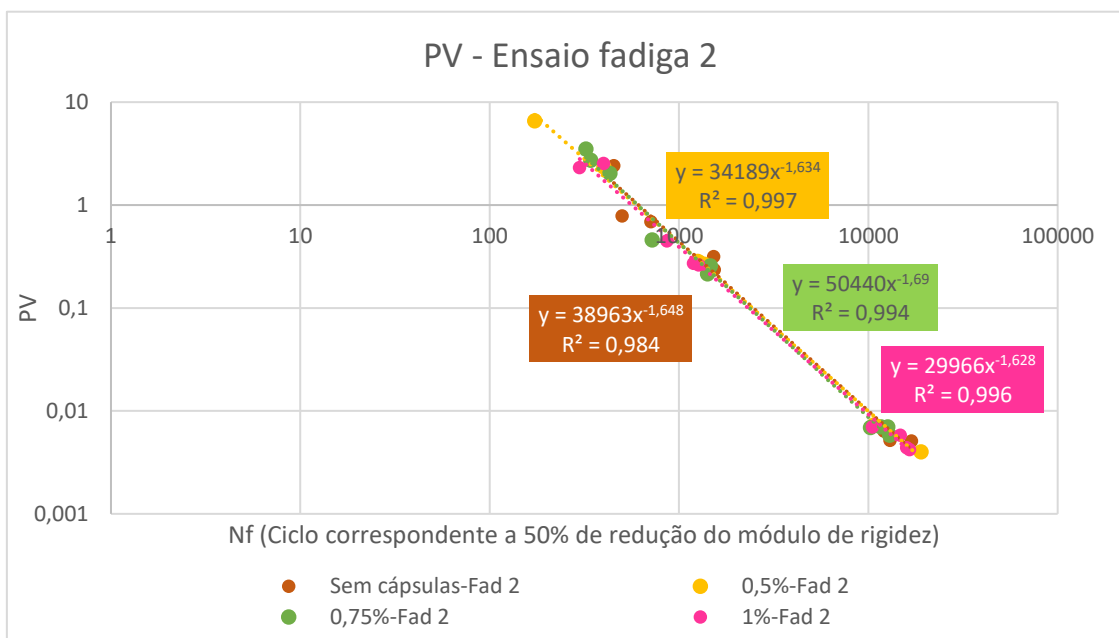


Figura 4.24 - Curvas PV- Nf para as quatro dosagens de cápsulas no ensaio de fadiga pós carregamento e regeneração

No entanto, analisando, para cada dosagem de cápsulas aplicada (Figuras 4.25 a 4.28), é possível verificar que ocorre uma diminuição do *Plateau value* do primeiro para o segundo ensaio de fadiga, o que pode ser justificado com o facto dos provetes já terem sido analisado uma vez e, assim, a quantidade de energia dissipada ser menor no segundo ensaio.

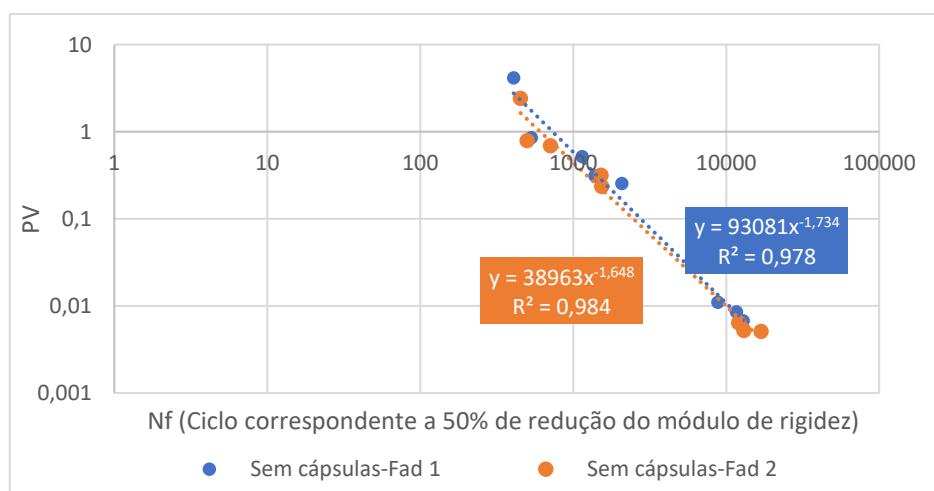


Figura 4.25 - Curvas PV- Nf para a mistura betuminosa sem cápsulas no ensaio de fadiga pós carregamento e regeneração

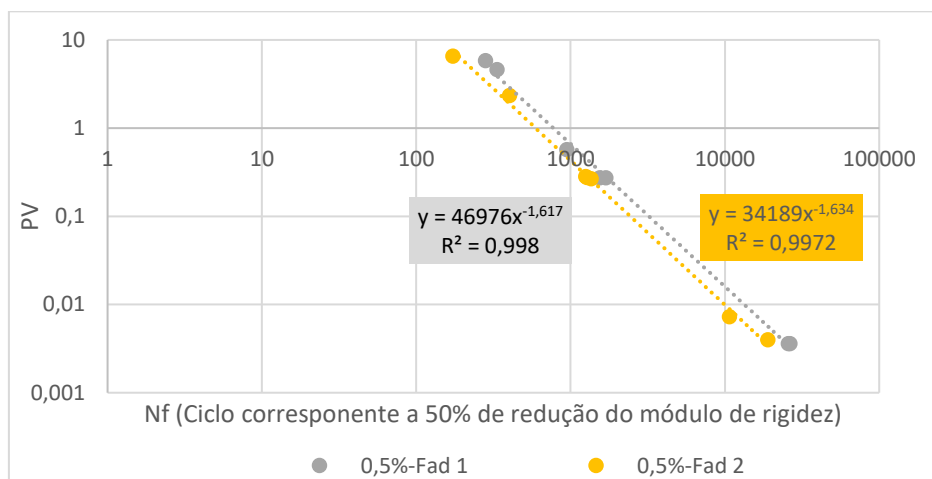


Figura 4.26 - Curvas PV- Nf para a mistura betuminosa com a dosagem de 0,5% no ensaio de fadiga pós carregamento e regeneração

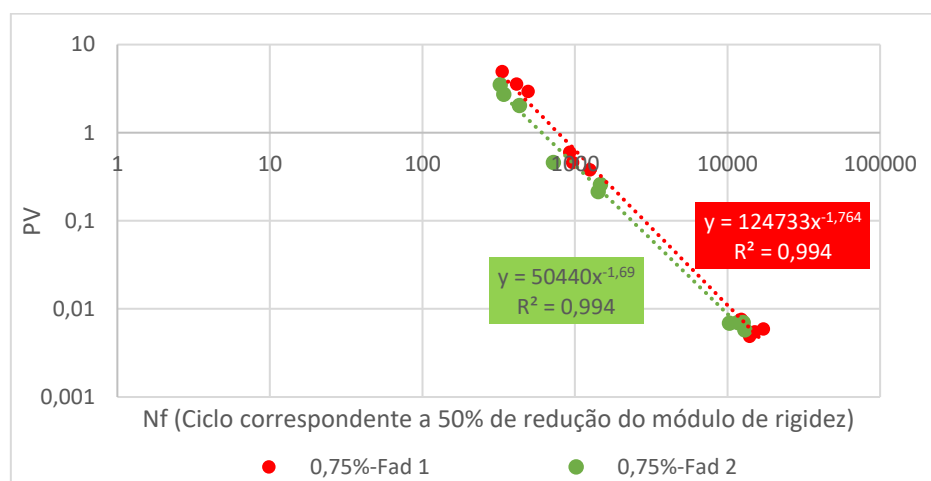


Figura 4.27 - Curvas PV- Nf para a mistura betuminosa com a dosagem de 0,75% no ensaio de fadiga pós carregamento e regeneração

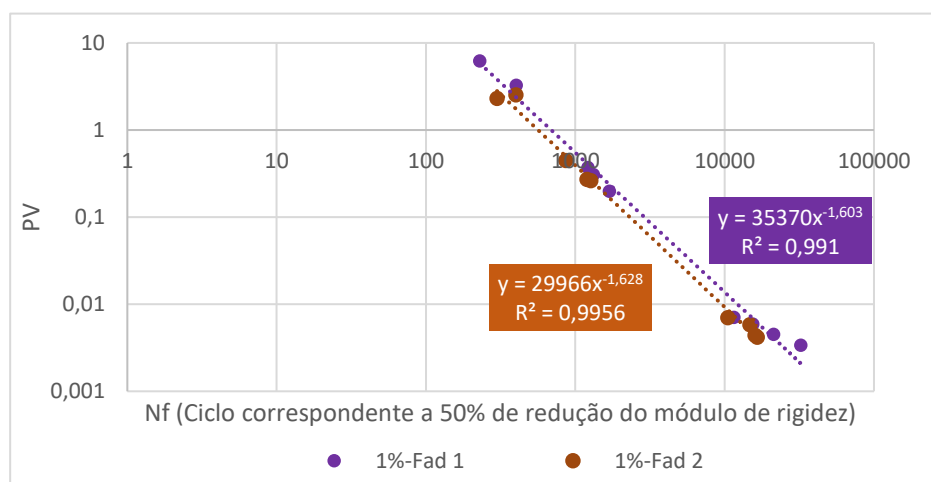


Figura 4.28 - Curvas PV- Nf para a mistura betuminosa com a dosagem de 1% no ensaio de fadiga pós carregamento e regeneração

4.6 Resistência à deformação permanente

A resistência à deformação permanente, no primeiro ensaio (Figura 4.29), é possível verificar que as dosagens de microcápsulas de 0,5% e 1% tiveram um comportamento semelhante, sendo que a dosagem de 1% acaba por melhorar a sua capacidade de resistir à deformação ao longo do ensaio, comparativamente com a dosagem de 0,5%. A situação de referência teve um comportamento similar ao apresentado para 0,75% de microcápsulas na sua constituição, o qual de todos teve o melhor desempenho à deformação permanente, como se pode observar no Tabela 4.9, em que teve os menores valores respeitantes à taxa de deformação permanente média e à percentagem de profundidade média da rodeira.

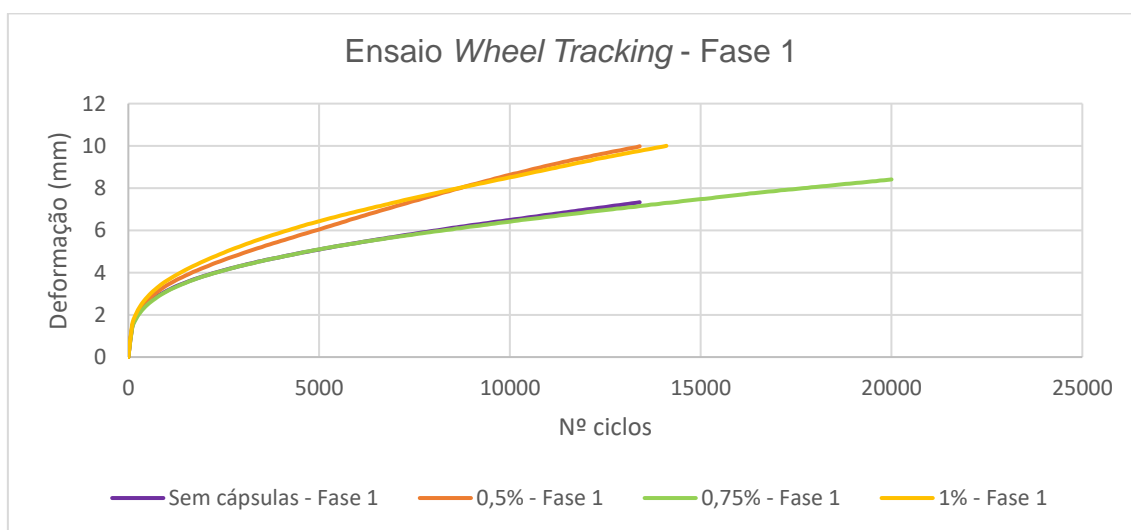


Figura 4.29 - Evolução da fase 1 do ensaio *Wheel Tracking*

Tabela 4.9 - Resultados da fase 1 do ensaio *Wheel Tracking*

Dosagem de cápsulas	Fase 1		
	h_{inicial} (mm)	WTS_{AIR} (mm/10 ³ ciclos)	PRD_{AIR} (%)
Sem Cápsulas (Condição de referência)	50	0,280	13,0%
0,50%	50	0,518	17,3%
0,75%	50	0,262	12,8%
1%	50	0,416	17,0%

Após a aplicação do primeiro ensaio e o subsequente período de repouso de 5 dias a 20°C, foi feito o ensaio *Wheel Tracking* uma segunda vez (Figura 4.30) e é possível verificar que ocorre um aumento generalizado em todas as dosagens na resistência à deformação permanente, o que pode ser justificado com o facto dos provetes estarem a ser ensaiados uma segunda vez, ocorrendo um fenómeno de sobre-compactação. De salientar que a dosagem de

0,75% apresenta a maior resistência à deformação permanente, à semelhança do ocorrido no primeiro ensaio, seguida da dosagem de 1%, sem cápsulas e, por fim, a de 0,5%.

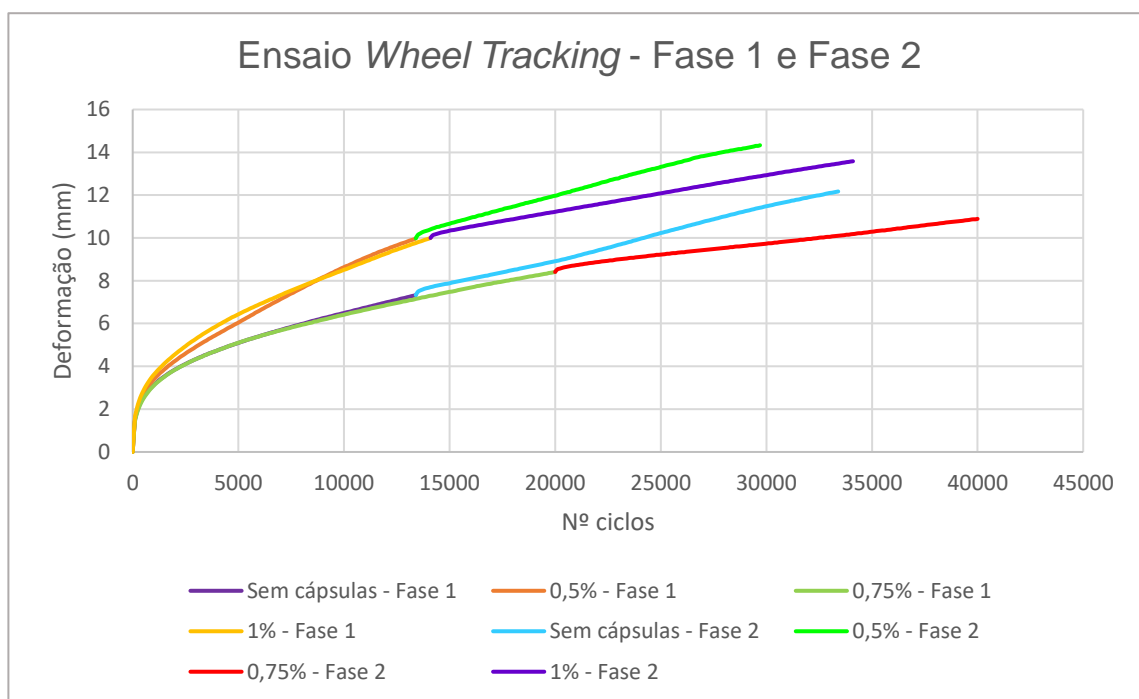


Figura 4.30 - Evolução das duas fases do ensaio Wheel Tracking

O efeito do período de repouso é observado em larga medida nos provetes com microcápsulas na sua constituição, em que, relativamente ao primeiro ensaio, são constatadas reduções entre 94,7% e 156,9% para o WTS_{AIR} (Tabela 4.10). Sendo que, para a condição de referência, sem microcápsulas na sua constituição, foi verificada uma redução de somente 16,7%. Tal ocorrência, pode ser justificada pela libertação do óleo das microcápsulas, o que contribui para a diminuição.

Tabela 4.10 - Resultados da fase 2 do ensaio Wheel Tracking

Dosagem de cápsulas	Fase 2				
	$h_{inicial}$ (mm)	WTS_{AIR} (mm/10 ³ ciclos)	Diferença para a fase 1	PRD_{AIR} (%)	Diferença para a fase 1
Sem Cápsulas (Condição de referência)	42,7	0,240	-16,7%	22,9%	-76,6%
0,50%	40,0	0,266	-94,7%	32,2%	-86,8%
0,75%	41,6	0,102	-156,9%	23,4%	-82,5%
1%	40,0	0,172	-141,9%	29,8%	-75,2%

Em Portugal, não há especificação em caderno de encargos tipo obra, quanto aos valores mínimos exigidos para os parâmetros do ensaio verificados no ensaio da resistência às deformações permanentes, a não ser para misturas betuminosas com betumes modificados com

borracha, em que, por exemplo, para uma mistura betuminosa com um betume de penetração nominal 35/50, é exigido um valor $\leq 0,15 \text{ mm}/10^3$ ciclos de carga para o WTS_{AIR} e $\leq 9,0\%$ para o PRD_{AIR} , segundo o caderno de encargos tipo obra da *Brisa*.

Contudo, em Espanha, em função do tráfego rodoviário são estabelecidos no PG3 (Dirección General de Carreteras (DGC). (2015)), limites para o WTS_{AIR} , em que devem ser $\leq 0,07 \text{ mm}/10^3$ ciclos de carga, para uma frequência de passagem de veículos por dia superior a 800, de $\leq 0,10 \text{ mm}/10^3$ ciclos de carga, para uma frequência de passagem entre 100 e 799 veículos e para uma frequência inferior a 99 veículos, não há exigência requerida. Assim, os valores verificados no procedimento experimental, de acordo com a PG3, as misturas betuminosas estudadas só poderiam ser aplicadas numa situação de frequência de tráfego rodoviário inferior a 100 veículos por dia.

5 - Considerações finais e desenvolvimentos futuros

O trabalho experimental da presente dissertação teve como propósito fundamental, a avaliação do efeito regenerador na mistura betuminosa decorrente da aplicação de cápsulas de alginato de cálcio, com óleo de girassol como agente de rejuvenescimento. Foram produzidos provetes prismáticos, para análise sob ensaios cíclicos de flexão em quatro pontos, nomeadamente no que respeita ao módulo de rigidez e à resistência à fadiga. Foi também avaliada a resistência às deformações permanentes, com base no Ensaio *Wheel Tracking*.

Em 2018, foi efetuado um estudo com cápsulas com uma estrutura semelhante às que foram utilizadas no presente programa experimental (Norambuena-Contreras, J. et. al (2018)), em que a regeneração resultante da adição das cápsulas à mistura betuminosa foi determinada mediante um ensaio de rotura em flexão em três pontos em provetes prismáticos realizado em dois momentos distintos, com um período de repouso entre os mesmos, para o desenvolvimento do efeito da regeneração. Os resultados permitiram concluir que a adição de cápsulas contribuiu, geralmente, para uma menor resistência mecânica, resultante dos valores de rigidez também menores, apresentados. Estes resultados acabam por estar em linha com os que foram apresentados na presente dissertação, em que nas três fases de avaliação do módulo de rigidez, os provetes de referência (sem cápsulas) apresentaram resultados superiores aos que tiveram as cápsulas adicionadas, nas diferentes dosagens estudadas.

Atendendo aos resultados que foram obtidos, verificou-se que o efeito da incorporação das cápsulas à mistura betuminosa não teve um efeito diferenciador relativamente à resistência à fadiga. No entanto, o módulo de rigidez apresentou reduções de sensivelmente o dobro do que foi apresentado nos provetes de referência, após o período de repouso.

Relativamente à resistência às deformações permanentes, os resultados apresentados pelos provetes com cápsulas revelaram uma assinalável melhoria do comportamento após o período de repouso, em comparação com os provetes de referência.

O conjunto de resultados alcançados no estudo experimental desenvolvido nesta dissertação são considerados úteis, uma vez que não tinham, até à presente data, sido alvo de estudo as misturas betuminosas com a incorporação de rejuvenescedores encapsulados com base nos ensaios efetuados de resistência à fadiga em flexão em quatro pontos e de avaliação da resistência às deformações permanentes. Desta forma foi possível conhecer melhor o comportamento deste tipo de materiais quando sujeitos a solicitações mecânicas e que permitirão a prossecução dos estudos desta solução de rejuvenescimento de misturas betuminosas, com claros impactos a nível de sustentabilidade económica e ambiental.

Considera-se assim que, em futuros estudos, deve ser explorado um maior conjunto de dosagens de cápsulas na mistura betuminosa, deverão ser investigadas e desenvolvidas novas técnicas de ativação das cápsulas e ainda proposta a avaliação da utilização das cápsulas em

camada de desgaste tendo em consideração o efeito da temperatura e do tipo de betume no seu comportamento.

Referências bibliográficas

- Asli, H., Ahmadiania, E., Zargar, M., & Karim, M. R. (2012). Investigation on physical properties of waste cooking oil–rejuvenated bitumen binder. *Construction and Building Materials*, 37, 398-405;
- Al-Mansoori, T., Micaelo, R., Artamendi, I., Norambuena-Contreras, J., & Garcia, A. (2017). Microcapsules for self-healing of asphalt mixture without compromising mechanical performance. *Construction and Building Materials*, 155, 1091-1100;
- Baptista, A. M. C. (2007). *Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central: Contribuição para o seu estudo e aplicação* (Doctoral dissertation);
- Barros, E. S. S. D. (2012). *Comportamento dos betumes em função da temperatura*;
- Branco, F., Pereira P., Picado Santos, L. (2005). *Pavimentos Rodoviários*. Edições Almedina. Coimbra, Portugal;
- Bell, C. A., AbWahab, Y., Cristi, M. E., & Sosnovske, D. (1994). Selection of laboratory aging procedures for asphalt-aggregate mixtures (No. SHRP-A-383). Strategic Highway Research Program;
- Blankendaal, T., Schuur, P., & Voordijk, H. (2014). Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: a scenario approach. *Journal of cleaner production*, 66, 27-36;
- Branthaver, J. F., Petersen, J. C., Robertson, R. E., Duvall, J. J., Kim, S. S., Harnsberger, P. M., Mill, T., Ensley, E. K., Barbour, F. A., Scharbron, J. F. (1993). Binder characterization and evaluation. Volume 2: Chemistry (No. SHRP-A-368);
- Boyer, R. E. (2000). Asphalt Rejuvenators “Fact, or Fable”. *Transportation systems*, 58, I;
- Brown, S. F., & Pell, P. S. (1974). Repeated loading of bituminous materials. CAPSA 74. National Institute for Road Research, Republic of South Africa, Durban;
- Cosco, S., Ambroggi, V., Musto, P., & Carfagna, C. (2007). Properties of poly (urea-formaldehyde) microcapsules containing an epoxy resin. *Journal of applied polymer science*, 105(3), 1400-1411;
- Dirección General de Carreteras (DGC). (2015). *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)*;

-
- Erkens, S. M. J. G. (2002). Asphalt concrete response (ACRe) - Determination, Modelling and Prediction. Delft University Press, Delft;
- Fakhri, M. (1999). Characterisation of asphalt pavement materials;
- Freire, A. C. (2002). Deformações permanentes de misturas betuminosas em pavimentos rodoviários;
- Garcia, A., Austin, C. J., & Jelfs, J. (2016). Mechanical properties of asphalt mixture containing sunflower oil capsules. *Journal of Cleaner Production*, 118, 124-132;
- Garcia, A., Jelfs, J., & Austin, C. J. (2015). Internal asphalt mixture rejuvenation using capsules. *Construction and Building Materials*, 101, 309-316;
- García, Á., Schlangen, E., & Van de Ven, M. (2011). Properties of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete. *Fuel*, 90(2), 583-591;
- García, A., Schlangen, E., van de Ven, M., & Sierra-Beltrán, G. (2010). Preparation of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete. *Journal of hazardous materials*, 184(1-3), 603-611;
- Hwang, J. S., Kim, J. N., Wee, Y. J., Yun, J. S., Jang, H. G., Kim, S. H., & Ryu, H. W. (2006). Preparation and characterization of melamine-formaldehyde resin microcapsules containing fragrant oil. *Biotechnology and bioprocess engineering*, 11(4), 332-336;
- Ji, J., Yao, H., Suo, Z., You, Z., Li, H., Xu, S., & Sun, L. (2016). Effectiveness of vegetable oils as rejuvenators for aged asphalt binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(3), D4016003;
- Jyothi, N. V. N., Prasanna, P. M., Sakarkar, S. N., Prabha, K. S., Ramaiah, P. S., & Srawan, G. Y. (2010). Microencapsulation techniques, factors influencing encapsulation efficiency. *Journal of microencapsulation*, 27(3), 187-197;
- Khan, Z. A., Wahab, H. I. A. A., Asi, I., & Ramadhan, R. (1998). Comparative study of asphalt concrete laboratory compaction methods to simulate field compaction. *Construction and Building Materials*, 12(6-7), 373-384;
- Li, R., Zhou, T., & Pei, J. (2015). Design, preparation and properties of microcapsules containing rejuvenator for asphalt. *Construction and Building Materials*, 99, 143-149;
- Masad, E., Little, D. N., Tashman, L., Saadeh, S., Al-Rousan, T., & Sukhwani, R. (2004). Evaluation of aggregate characteristics affecting HMA concrete performance;

-
- Micaelo, R., Al-Mansoori, T., & Garcia, A. (2016). Study of the mechanical properties and self-healing ability of asphalt mixture containing calcium-alginate capsules. *Construction and Building Materials*, 123, 734-744;
- Minhoto, M. (2007). Consideração da temperatura no comportamento à reflexão de fendas dos reforços de pavimentos rodoviários flexíveis;
- Miranda, H. M. (2010). Slides da disciplina de Pavimentação. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa;
- Mollenhauer, K., Wistuba, M., & Rabe, R. (2009). Loading frequency and fatigue: In situ conditions & impact on test results. University of Minho, Portugal;
- Monismith, C. L., McLean, D. B., & Inkabi, K. (1977). Design considerations for asphalt pavements;
- Mookhoek, S. D., Fischer, H. R., & van der Zwaag, S. (2012). Alginate fibres containing discrete liquid filled vacuoles for controlled delivery of healing agents in fibre reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(12), 2176-2182;
- Neves, J., & Correia, A. G. (2006). Caracterização da rigidez de misturas betuminosas em ensaios de tracção indirecta por compressão diametral de provetes cilíndricos;
- Norambuena-Contreras, J., Yalcin, E., Garcia, A., Al-Mansoori, T., Yilmaz, M., & Hudson-Griffiths, R. (2018). Effect of mixing and ageing on the mechanical and self-healing properties of asphalt mixtures containing polymeric capsules. *Construction and Building Materials*, 175, 254-266;
- Owende, P. M., Hartman, A. M., Ward, S. M., Gilchrist, M. D., & O'Mahony, M. J. (2001). Minimizing distress on flexible pavements using variable tire pressure. *Journal of Transportation Engineering*, 127(3), 254-262;
- Paciência, E. A. E. (2018). Auto-regeneração de misturas betuminosas com agentes encapsulados;
- Pais, J. C., & Palha, C. A. O. F. (2010). Resistência à fadiga em misturas betuminosas para pavimentos rodoviários. In 8º Congresso Nacional de Mecânica Experimental, Guimarães (pp. 1-12);
- Paul, D. K., Sirin, O., & Kassem, E. (2016). Laboratory investigation of asphalt mixture aging. In *Proceedings of 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress*;

-
- Qiu, J. (2012). Self-healing of asphalt mixtures: towards a better understanding of the mechanism (Doctoral dissertation, TU Delft, Delft University of Technology);
- Sengoz, B., & Agar, E. (2007). Effect of asphalt film thickness on the moisture sensitivity characteristics of hot-mix asphalt. *Building and environment*, 42(10), 3621-3628;
- Shell (2003). The shell bitumen handbook. Fifth Edition, Thomas Telford Publishing, London;
- Shen, J., Amirkhanian, S., & Aune Miller, J. (2007). Effects of rejuvenating agents on superpave mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(5), 376-384;
- Shen, S., & Carpenter, S. H. (2006). Dissipated energy concepts for HMA performance: fatigue and healing (Vol. 67, No. 11);
- Shen, S., Airey, G. D., Carpenter, S. H., & Huang, H. (2006). A dissipated energy approach to fatigue evaluation. *Road materials and pavement design*, 7(1), 47-69;
- Shen, S., Chiu, H. M., & Huang, H. (2010). Characterization of fatigue and healing in asphalt binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(9), 846-852;
- SHRP (Strategic Highway Research Program). National Research Council. (1994). Fatigue response of asphalt-aggregate mixes;
- Stuart, K. D. (1990). Moisture damage in asphalt mixtures-a state-of-the-art report;
- Su, J. F., & Schlangen, E. (2012). Synthesis and physicochemical properties of high compact microcapsules containing rejuvenator applied in asphalt. *Chemical engineering journal*, 198, 289-300;
- Su, J. F., Qiu, J., & Schlangen, E. (2013). Stability investigation of self-healing microcapsules containing rejuvenator for bitumen. *Polymer degradation and stability*, 98(6), 1205-1215. Branthaver, J. F., Petersen, J. C., Robertson, R. E., Duvall, J. J., Kim, S. S., Harnsberger, P. M., Mill, T., Ensley, E. K., Barbour, F. A., Scharbron, J. F. (1993). Binder characterization and evaluation. Volume 2: Chemistry (No. SHRP-A-368);
- Su, J. F., Qiu, J., Schlangen, E., & Wang, Y. Y. (2015). Investigation the possibility of a new approach of using microcapsules containing waste cooking oil: In situ rejuvenation for aged bitumen. *Construction and Building Materials*, 74, 83-92;
- Su, J. F., Schlangen, E., & Wang, Y. Y. (2015). Investigation the self-healing mechanism of aged bitumen using microcapsules containing rejuvenator. *Construction and Building Materials*, 85, 49-56;
-

-
- Su, J. F., Wang, Y. Y., Han, N. X., Yang, P., & Han, S. (2016). Experimental investigation and mechanism analysis of novel multi-self-healing behaviors of bitumen using microcapsules containing rejuvenator. *Construction and Building Materials*, 106, 317-329;
- Suave, J., Dall'Agnol, E. C., Pezzin, A. P. T., Silva, D. A. K., Meier, M. M., & Soldi, V. (2006). Microencapsulação: Inovação em diferentes áreas. *Revista Saúde e Ambiente/Health and Environment Journal*, 7(2), 12-20;
- Tabaković, A., Schuyffel, L., Karač, A., & Schlangen, E. (2017). An evaluation of the efficiency of compartmented alginate fibres encapsulating a rejuvenator as an asphalt pavement healing system. *Applied Sciences*, 7(7), 647;
- Tangella, S. R., Craus, J., Deacon, J. A., & Monismith, C. L. (1990). Summary report on fatigue response of asphalt mixtures (No. SHRP-A-312);
- Tayebali, A. A., Rowe, G. M., & Sousa, J. B. (1992). Fatigue response of asphalt-aggregate mixtures (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 61.
- Uge, P., & Van de Loo, P. J. (1974). Permanent deformation of asphalt mixes. *Shell Research Laboratories*;
- Yuan, L., Liang, G., Xie, J., Li, L., & Guo, J. (2006). Preparation and characterization of poly (urea-formaldehyde) microcapsules filled with epoxy resins. *polymer*, 47(15), 5338-5349;
- Zargar, M., Ahmadiania, E., Asli, H., & Karim, M. R. (2012). Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen. *Journal of hazardous materials*, 233, 254-258.

Documentos normativos

- EN 12697-6:2012, *Bituminous mixtures - Test methods - Determination of bulk density of bituminous specimens;*
- EN 12697-8:2003, *Bituminous mixtures - Test methods - Determination of void characteristics of bituminous specimens;*
- EN 12697-22:2007, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Wheel tracking;*
- EN 12697-24:2012, *Bituminous mixtures - Test methods - Resistance to fatigue;*
- EN 12697-26:2012, *Bituminous mixtures - Test methods - Stiffness;*
- EN 12697-29:2002, *Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Determination of the dimensions of a bituminous specimen;*
- EN 12697-33:2007, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Specimen prepared by roller compactor;*
- EN 12697-35:2007, *Bituminous mixtures - Test methods - Laboratory mixing;*
- EN 13108-1:2009, *Bituminous mixtures - Material specifications - Asphalt Concrete.*

Anexos

Anexo A -Propriedades volumétricas

Identificação do provete			SC 1	SC 2	SC 3	SC 4
T	Temperatura da água	(°C)	21	21	21	21
m_1	Massa do provete seco	(g)	2433,0	2408,1	2418,1	2420,0
$\rho_w=1,00025205+(7,59 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$	Massa volúmica da água à temperatura de ensaio	(Mg/m ³)	0,9981	0,9981	0,9981	0,9981
m_2	Massa do provete saturado dentro de água	(g)	1440,2	1428,0	1433,8	1435,1
m_3	Massa do provete saturado com a superfície seca	(g)	2436,3	2410,6	2420,4	2422,1
V	Volume do provete	(ml)	998,0	984,5	988,5	988,9
$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$	Baridade do provete	(Mg/m ³)	2,438	2,446	2,446	2,447
		(Kg/m ³)	2437,89	2446,09	2446,29	2447,22
Vm	Porosidade do provete	(%)	4,40	4,08	4,07	4,03

Identificação do provete			SC 5	SC 6	SC 7	SC 8
T	Temperatura da água	(°C)	21	21	21	21
m_1	Massa do provete seco	(g)	2420,3	2396,4	2417,6	2414,9
$\rho_w=1,00025205+(7,59 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$	Massa volúmica da água à temperatura de ensaio	(Mg/m ³)	0,9981	0,9981	0,9981	0,9981
m_2	Massa do provete saturado dentro de água	(g)	1432,9	1419,1	1433,2	1430,4
m_3	Massa do provete saturado com a superfície seca	(g)	2423,3	2399,7	2420,2	2417,0
V	Volume do provete	(ml)	992,3	982,5	988,9	988,5
$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$	Baridade do provete	(Mg/m ³)	2,439	2,439	2,445	2,443
		(Kg/m ³)	2439,12	2439,17	2444,79	2443,05
Vm	Porosidade do provete	(%)	4,35	4,35	4,13	4,19

Identificação do provete			SC 9	SC 10	SC 41	SC 42
T	Temperatura da água	(°C)	21	21	21	21
m_1	Massa do provete seco	(g)	2403,7	2421,7	2414,6	2424,4
$\rho_w=1,00025205+(7,59 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$	Massa volúmica da água à temperatura de ensaio	(Mg/m ³)	0,9981	0,9981	0,9981	0,9981
m_2	Massa do provete saturado dentro de água	(g)	1422,7	1431,9	1413,9	1430,5
m_3	Massa do provete saturado com a superfície seca	(g)	2405,7	2424,4	2419,0	2428,0
V	Volume do provete	(ml)	984,9	994,4	1007,0	999,4
$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$	Baridade do provete	(Mg/m ³)	2,441	2,435	2,398	2,426
		(Kg/m ³)	2440,62	2435,36	2397,78	2425,86
Vm	Porosidade do provete	(%)	4,29	4,50	5,97	4,87

Identificação do provete			SC 43	SC 44	SC 45
T	Temperatura da água	(°C)	21	21	21
m_1	Massa do provete seco	(g)	2421,9	2426,3	2424,2
$\rho_w=1,00025205+(7,59 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$	Massa volúmica da água à temperatura de ensaio	(Mg/m ³)	0,9981	0,9981	0,9981
m_2	Massa do provete saturado dentro de água	(g)	1425,9	1431,0	1424,4
m_3	Massa do provete saturado com a superfície seca	(g)	2424,9	2429,5	2430,3
V	Volume do provete	(ml)	1000,9	1000,4	1007,8
$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$	Baridade do provete	(Mg/m ³)	2,420	2,425	2,405
		(Kg/m ³)	2419,72	2425,33	2405,40
Vm	Porosidade do provete	(%)	5,11	4,89	5,67

Identificação do provete			0,5% - 11	0,5% - 12	0,5% - 13	0,5% - 14
T	Temperatura da água	(°C)	22	22	22	22
m_1	Massa do provete seco	(g)	2402,5	2379,4	2382,4	2376,8
$\rho_w=1,00025205+(7,59 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$	Massa volúmica da água à temperatura de ensaio	(Mg/m ³)	0,9978	0,9978	0,9978	0,9978
m_2	Massa do provete saturado dentro de água	(g)	1420,2	1402,6	1401,9	1399,6
m_3	Massa do provete saturado com a superfície seca	(g)	2405,1	2383,3	2385,1	2379,5
V	Volume do provete	(ml)	987,1	982,9	985,4	982,1
$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$	Baridade do provete	(Mg/m ³)	2,434	2,421	2,418	2,420
		(Kg/m ³)	2433,97	2420,89	2417,78	2420,22
Vm	Porosidade do provete	(%)	3,95	4,46	4,59	4,49

Identificação do provete			0,5% - 15	0,5% - 16	0,5% - 17	0,5% - 18
T	Temperatura da água	(°C)	22	22	22	22
m_1	Massa do provete seco	(g)	2394,5	2402,0	2392,4	2376,8
$\rho_w=1,00025205+(7,59 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$	Massa volúmica da água à temperatura de ensaio	(Mg/m ³)	0,9978	0,9978	0,9978	0,9978
m_2	Massa do provete saturado dentro de água	(g)	1411,8	1416,8	1409,4	1398,2
m_3	Massa do provete saturado com a superfície seca	(g)	2397,1	2404,6	2395,1	2379,3
V	Volume do provete	(ml)	987,5	990,0	987,9	983,3
$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$	Baridade do provete	(Mg/m ³)	2,425	2,426	2,422	2,417
		(Kg/m ³)	2424,88	2426,32	2421,77	2417,26
Vm	Porosidade do provete	(%)	4,31	4,25	4,43	4,61

Identificação do provete			0,5% - 19	0,5% - 20
T	Temperatura da água	(°C)	22	22
m_1	Massa do provete seco	(g)	2379,2	2400,3
$\rho_w=1,00025205+(7,59 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$	Massa volúmica da água à temperatura de ensaio	(Mg/m ³)	0,9978	0,9978
m_2	Massa do provete saturado dentro de água	(g)	1397,8	1417,2
m_3	Massa do provete saturado com a superfície seca	(g)	2381,9	2403,1
V	Volume do provete	(ml)	986,3	988,1
$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$	Baridade do provete	(Mg/m ³)	2,412	2,429
		(Kg/m ³)	2412,32	2429,27
Vm	Porosidade do provete	(%)	4,80	4,13

Identificação do provete			0,75% - 21	0,75% - 22	0,75% - 23	0,75% - 24
T	Temperatura da água	(°C)	20	20	20	20
m_1	Massa do provete seco	(g)	2383,7	2371,5	2385,6	2401,7
$\rho_w=1,00025205+(7,59 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$	Massa volúmica da água à temperatura de ensaio	(Mg/m ³)	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983
m_2	Massa do provete saturado dentro de água	(g)	1398,8	1390,9	1399,3	1415,0
m_3	Massa do provete saturado com a superfície seca	(g)	2386,1	2373,7	2388,0	2404,8
V	Volume do provete	(ml)	989,0	984,5	990,4	991,5
$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$	Baridade do provete	(Mg/m ³)	2,410	2,409	2,409	2,422
		(Kg/m ³)	2410,26	2408,90	2408,76	2422,32
Vm	Porosidade do provete	(%)	4,58	4,64	4,64	4,10

Identificação do provete			0,75% - 25	0,75% - 26	0,75% - 27	0,75% - 28
T	Temperatura da água	(°C)	20	20	20	20
m_1	Massa do provete seco	(g)	2384,3	2394,5	2389,3	2400,0
$\rho_w=1,00025205+(7,59 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$	Massa volúmica da água à temperatura de ensaio	(Mg/m ³)	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983
m_2	Massa do provete saturado dentro de água	(g)	1406,6	1413,6	1409,8	1410,5
m_3	Massa do provete saturado com a superfície seca	(g)	2387,4	2398,0	2392,6	2402,7
V	Volume do provete	(ml)	982,5	986,1	984,5	993,9
$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$	Baridade do provete	(Mg/m ³)	2,427	2,428	2,427	2,415
		(Kg/m ³)	2426,84	2428,31	2426,98	2414,76
Vm	Porosidade do provete	(%)	3,93	3,87	3,92	4,40

Identificação do provete			0,75% - 29	0,75% - 30
T	Temperatura da água	(°C)	20	20
m_1	Massa do provete seco	(g)	2386,9	2394,4
$\rho_w=1,00025205+(7,59 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$	Massa volúmica da água à temperatura de ensaio	(Mg/m ³)	0,9983	0,9983
m_2	Massa do provete saturado dentro de água	(g)	1399,0	1402,3
m_3	Massa do provete saturado com a superfície seca	(g)	2389,7	2397,1
V	Volume do provete	(ml)	992,4	996,5
$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$	Baridade do provete	(Mg/m ³)	2,405	2,403
		(Kg/m ³)	2405,21	2402,82
Vm	Porosidade do provete	(%)	4,78	4,88

Identificação do provete			1% - 31	1% - 32	1% - 33	1% - 34
T	Temperatura da água	(°C)	21	21	21	21
m_1	Massa do provete seco	(g)	2395,6	2375,3	2381,6	2384,3
$\rho_w=1,00025205+(7,59 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$	Massa volúmica da água à temperatura de ensaio	(Mg/m ³)	0,9981	0,9981	0,9981	0,9981
m_2	Massa do provete saturado dentro de água	(g)	1404,9	1393,1	1399,4	1397,2
m_3	Massa do provete saturado com a superfície seca	(g)	2399,8	2379,8	2387,3	2388,2
V	Volume do provete	(ml)	996,8	988,6	989,8	992,9
$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$	Baridade do provete	(Mg/m ³)	2,403	2,403	2,406	2,401
		(Kg/m ³)	2403,31	2402,74	2406,19	2401,38
Vm	Porosidade do provete	(%)	4,55	4,58	4,44	4,63

Identificação do provete			1% - 35	1% - 36	1% - 37	1% - 38
T	Temperatura da água	(°C)	21	21	21	21
m_1	Massa do provete seco	(g)	2392,3	2390,0	2392,1	2382,4
$\rho_w=1,00025205+(7,59 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$	Massa volúmica da água à temperatura de ensaio	(Mg/m ³)	0,9981	0,9981	0,9981	0,9981
m_2	Massa do provete saturado dentro de água	(g)	1402,9	1389,7	1391,9	1400,3
m_3	Massa do provete saturado com a superfície seca	(g)	2395,8	2397,4	2397,5	2386,3
V	Volume do provete	(ml)	994,8	1009,6	1007,5	987,9
$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$	Baridade do provete	(Mg/m ³)	2,405	2,367	2,374	2,412
		(Kg/m ³)	2404,83	2367,23	2374,26	2411,64
Vm	Porosidade do provete	(%)	4,49	5,99	5,71	4,22

Identificação do provete			1% - 39	1% - 40
T	Temperatura da água	(°C)	21	21
m_1	Massa do provete seco	(g)	2388,8	2377,2
$\rho_w=1,00025205+(7,59 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$	Massa volúmica da água à temperatura de ensaio	(Mg/m ³)	0,9981	0,9981
m_2	Massa do provete saturado dentro de água	(g)	1388,9	1373,9
m_3	Massa do provete saturado com a superfície seca	(g)	2392,5	2381,7
V	Volume do provete	(ml)	1005,5	1009,7
$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$	Baridade do provete	(Mg/m ³)	2,376	2,354
		(Kg/m ³)	2375,71	2354,32
Vm	Porosidade do provete	(%)	5,65	6,50

Identificação do provete			SC	0.5%	0.75%	1.0%
T	Temperatura da água	(°C)	22	22	22	22
m_1	Massa do provete seco	(g)	11266,2	11263,3	11189,9	11203,1
$\rho_w=1,00025205+(7,59 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$	Massa volúmica da água à temperatura de ensaio	(Mg/m ³)	0,9978	0,9978	0,9978	0,9978
m_2	Massa do provete saturado dentro de água	(g)	6661,0	6635,3	6547,0	6561,1
m_3	Massa do provete saturado com a superfície seca	(g)	11277,4	11275,1	11199,2	11213,3
V	Volume do provete	(ml)	4626,6	4650,0	4662,5	4662,5
$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$	Baridade do provete	(Mg/m ³)	2,435	2,422	2,400	2,403
		(Kg/m ³)	2435,10	2422,20	2400,00	2402,83
Vm	Porosidade do provete	(%)	4,51	4,41	4,99	4,57

Anexo B – Resistência à fadiga

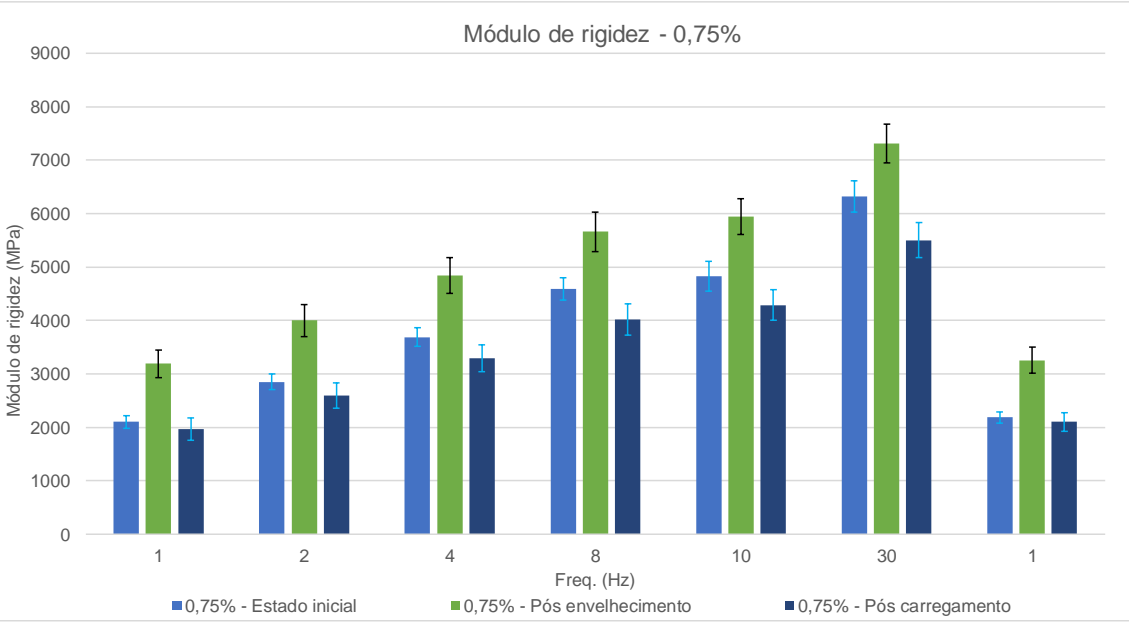
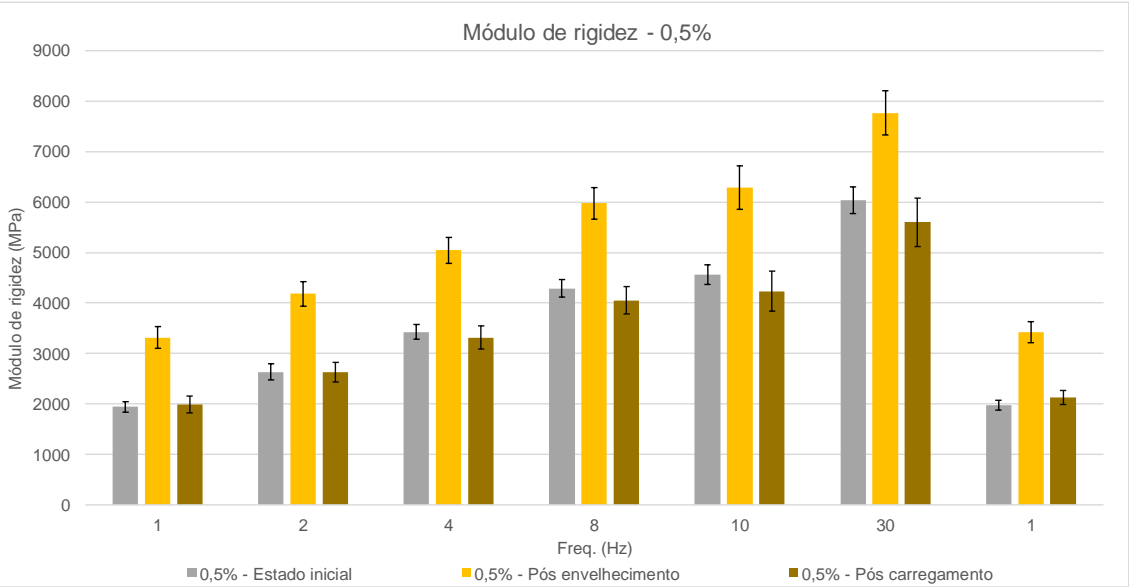
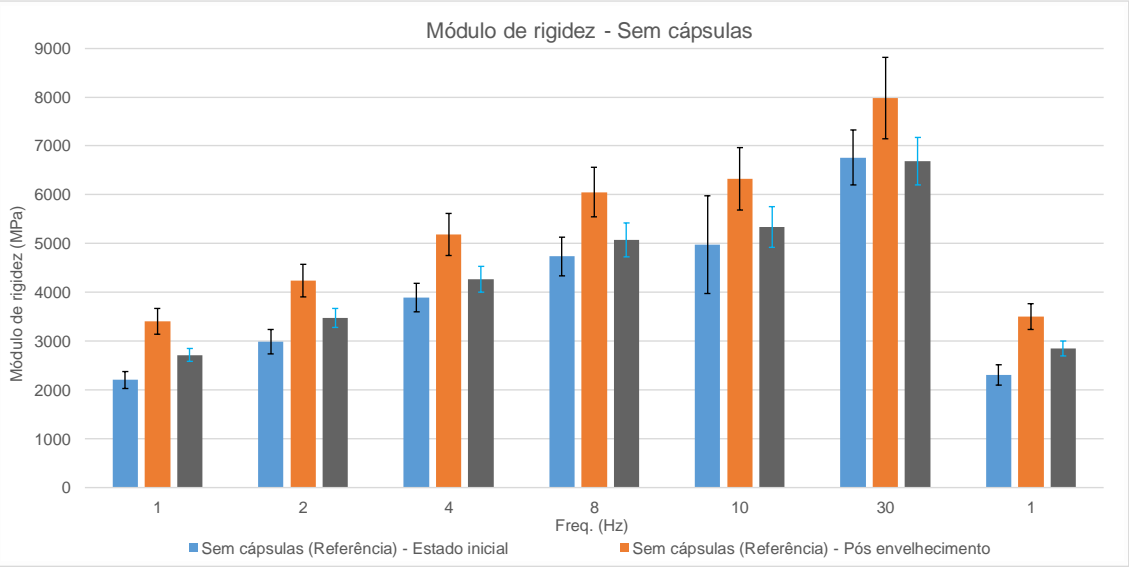
Provete	I - Pós envelhecimento SC		II - Pós carregamento SC		Melhoria (%)
	Nº ciclos	Extensão (x10 ⁻⁶ m)	Nº ciclos	Extensão (x10 ⁻⁶ m)	
SC4	1148	400	713	400	-37,9%
SC5	3712	300	2555	300	-31,2%
SC6	11686	200	12110	200	3,6%
SC7	3918	300	5068	300	29,4%
SC8	1393	400	1525	400	9,5%
SC9	507312	100	430246	100	-15,2%
SC10	597471	100	478431	100	-19,9%
SC41	12946	200	13045	200	0,8%
SC42	2080	400	1537	400	-26,1%
SC43	408	600	453	600	11,0%
SC44	8838	200	16916	200	91,4%
SC45	533	400	501	400	-6,0%
Valor médio					7,8%

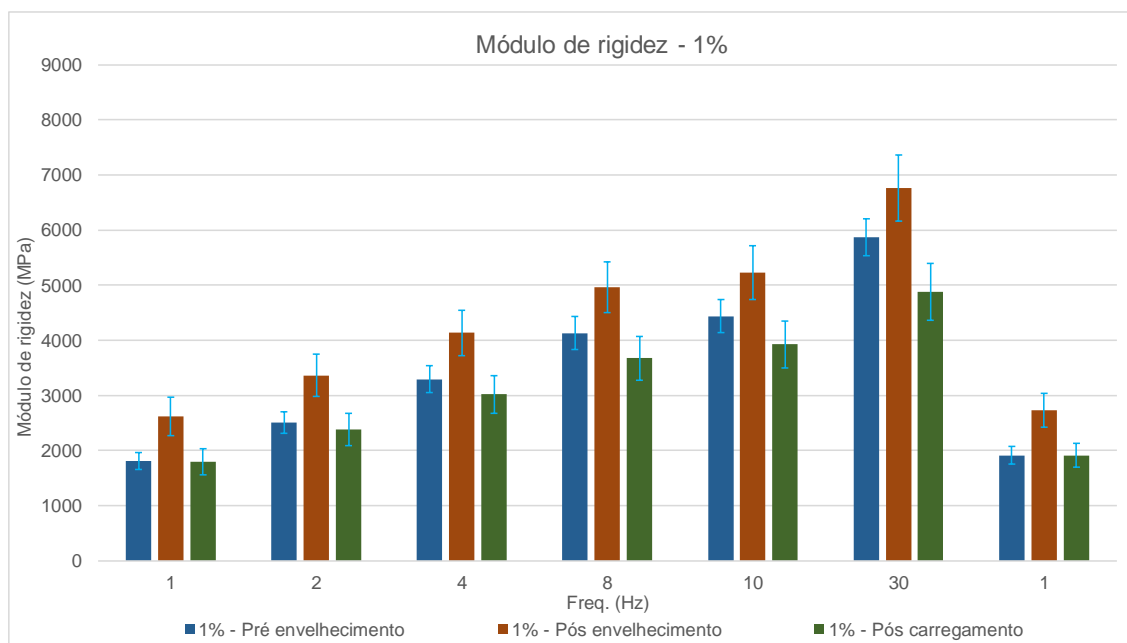
Provete	I - Pós envelhecimento - 0,5%		II - Pós carregamento - 0,5%		Melhoria (%)
	Nº ciclos	Extensão (x10 ⁻⁶ m)	Nº ciclos	Extensão (x10 ⁻⁶ m)	
0,5% - 11	18560	200	3781	200	-79,6%
0,5% - 12	947	400	1281	400	35,3%
0,5% - 13	334	600	402	600	20,4%
0,5% - 14	26456	200	19051	200	-28,0%
0,5% - 15	1548	400	1362	400	-12,0%
0,5% - 16	282	600	173	600	-38,7%
0,5% - 17	25850	200	10730	200	-58,5%
0,5% - 18	1693	400	1256	400	-25,8%
0,5% - 19	17777	200	12509	200	-29,6%
Valor médio					-24,1%

Provete	I - Pós envelhecimento 0,75%		II - Pós carregamento 0,75%		Melhoria (%)
	Nº ciclos	Extensão (x10 ⁻⁶ m)	Nº ciclos	Extensão (x10 ⁻⁶ m)	
0,75% - 21	13962	200	12978	200	-7,0%
0,75% - 22	965	400	723	400	-25,1%
0,75% - 23	415	600	433	600	4,3%
0,75% - 24	15100	200	11679	200	-22,7%
0,75% - 25	925	400	1419	400	53,4%
0,75% - 26	333	600	342	600	2,7%
0,75% - 27	17137	200	12674	200	-26,0%
0,75% - 28	1249	400	1470	400	17,7%
0,75% - 29	492	600	323	600	-34,3%
0,75% - 30	12327	200	10279	200	-16,6%
Valor médio					-5,4%

Provete	I - Pós envelhecimento - 1%		II - Pós carregamento - 1%		Melhoria (%)
	Nº ciclos	Extensão (x10 ⁻⁶ m)	Nº ciclos	Extensão (x10 ⁻⁶ m)	
1% - 31	32448	200	16548	200	-49,0%
1% - 32	1214	400	864	400	-28,8%
1% - 34	21230	200	15955	200	-24,8%
1% - 35	1325	400	1197	400	-9,7%
1% - 36	229	600	299	600	30,6%
1% - 37	11539	200	10510	200	-8,9%
1% - 38	1696	400	1271	400	-25,1%
1% - 39	402	600	400	600	-0,5%
1% - 40	15441	200	14743	200	-4,5%
Valor médio					-13,4%

Anexo C – Módulo de rigidez nas três fases de análise





Módulo de rigidez (MPa)

Sem cápsulas (Referência)																					
Freq. (Hz)	1			2			4			8			10			30			1		
Medição	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
SC1	1984,6			2788,5			3656,7			4645,0			5414,7			7761,3			2511,2		
SC2	2017,6			2757,2			3538,4			4447,1			4739,2			6156,9			2110,3		
SC3	2242,8	3625,0		3012,2	4566,4		3904,1	5488,9		4832,6	6674,6		5097,9	5571,4		6616,8	8504,2		2281,4	3684,0	
SC4	2117,3	3463,4	2526,6	2837,2	4479,8	3355,9	3773,1	5543,6	4218,5	4529,0	6602,3	5052,8	4819,3	7225,9	5381,8	6400,4	8551,9	6817,2	2160,0	3506,1	2741,8
SC5	1985,4	3305,2	2755,2	2557,4	4024,1	3607,4	3639,7	5149,8	4453,1	3962,3	6232,2	5382,5	2777,9	7092,2	5678,6	1995,2	8255,7	7146,0	2222,7	3515,2	2996,3
SC6	2188,1	3469,9	2839,4	3136,9	4429,4	3628,1	4003,4	5532,9	4435,3	4547,7	6406,8	5322,8	2059,9	6764,3	5710,8	1624,7	7979,2	6988,3	1960,4	3582,3	2941,2
SC7	2297,9	3506,1	2779,5	3095,4	4244,4	3646,1	3990,6	5422,7	4554,2	4867,8	5912,6	5428,4	5179,6	6896,4	5708,1	6844,7	8357,1	6934,8	2346,3	3599,5	2997,8
SC8	2293,3	3623,2	2915,5	3108,8	4588,6	3775,6	3994,0	5560,8	4631,6	4941,7	6550,5	5493,0	5267,9	6825,5	5797,8	6865,3	8200,8	7535,6	2331,5	3759,7	3064,8
SC9	2069,8	3421,6	2870,8	2774,5	4354,0	3685,1	3553,6	5399,1	4509,0	4379,2	6358,8	5357,9	4637,7	6448,7	5670,4	6190,0	8137,5	7030,9	2078,2	3625,6	2986,0
SC10	2075,5	3414,4	2795,5	2814,9	4301,1	3605,2	3681,9	5207,7	4451,9	4557,8	6144,9	5427,1	4856,5	6363,8	5646,0	6373,6	7884,4	6966,6	2114,5	3558,1	2932,7
SC41	2123,1	2616,5	2553,4	2870,2	3334,2	3200,5	3653,8	4024,8	3872,3	4492,4	4765,3	4532,6	4758,8	5009,7	5188,0	6095,9	6246,5	5931,9	2236,1	2731,0	2642,0
SC42	2319,1	3319,2	2732,1	3176,1	4073,0	3436,1	4103,8	4886,9	4163,4	5138,5	5667,6	4818,4	5524,2	5925,5	4484,0	7171,1	7114,5	6276,0	2451,2	3402,5	2851,3
SC43	2453,3	3733,0	2583,8	3296,4	4549,8	3291,9	4226,8	5466,9	4021,2	5151,3	6007,3	4822,8	5471,9	6535,7	5040,0	7083,6	9440,9	6386,0	2590,5	3776,2	2674,6
SC44	2650,3	3262,2	2620,5	3605,0	3926,5	3271,4	4677,3	4673,3	3996,6	5732,4	5520,9	4726,8	6072,7	5793,6	5019,3	7896,3	6535,6	6244,2	2780,1	3245,0	2662,1
SC45	2218,4	3479,6	2564,4	3003,8	4215,3	3229,0	3866,7	4948,7	3886,8	4776,8	5790,5	4555,0	5059,2	5750,7	4755,4	6411,3	8489,5	5938,7	2343,7	3536,5	2656,1
Média	2202,4	3403,0	2711,4	2989,0	4237,4	3477,7	3884,2	5177,4	4266,2	4733,4	6048,8	5076,7	4976,9	6323,3	5340,0	6759,0	7976,8	6683,0	2301,2	3501,7	2845,5
Desvio padrão	177,5	261,2	130,0	251,8	331,4	193,2	292,1	431,3	261,1	398,7	509,5	350,6	1004,0	638,6	417,6	564,1	838,3	490,1	208,5	260,3	153,2

0,50%																					
Freq. (Hz)	1			2			4			8			10			30			1		
Medição	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
0,5% - 11	1726,4	3502,0	2000,4	2275,0	4393,7	2643,6	3140,8	5292,1	3323,7	3944,4	6184,3	4068,2	4163,5	6381,4	3978,2	5448,5	7785,9	5523,5	1773,9	3597,2	2114,0
0,5% - 12	1891,8	3506,6	2013,8	2600,8	4395,5	2639,0	3410,7	5233,4	3325,2	4258,7	6109,2	4104,8	4469,3	6333,0	4394,6	5965,8	7591,6	5946,2	1981,6	3617,3	2245,7
0,5% - 13	1828,5	3086,9	1901,7	2475,0	3892,4	2505,0	3254,8	4747,0	3125,8	4068,8	5701,6	3841,8	4355,5	5794,9	3869,0	5767,9	9119,4	5237,9	1878,4	3201,6	2019,7
0,5% - 14	2063,1	3175,4	2272,0	2822,8	4162,2	2987,0	3628,1	4961,2	3685,1	4508,6	5961,4	4459,5	4830,4	6204,4	4582,4	6410,8	8089,5	6011,0	2110,9	3398,7	2356,6
0,5% - 15	1974,6	3623,3	1928,3	2672,7	4478,0	2562,7	3452,9	5338,7	3251,6	4271,1	6177,8	3950,1	4612,5	6449,2	4365,7	6058,9	7682,9	5291,2	1969,5	3718,1	2097,7
0,5% - 16	1996,9	3478,5	1656,0	2716,6	4347,6	2258,7	3528,5	5258,5	2940,8	4410,7	6167,2	3634,0	4672,1	6518,3	3692,2	6171,8	7926,6	5054,7	2003,1	3540,5	1886,4
0,5% - 17	2004,2	3205,0	1963,5	2696,0	4051,8	2586,4	3471,2	4862,3	3268,9	4357,5	5721,3	3933,1	4628,4	5984,9	4091,1	6190,7	7305,6	5361,8	2007,1	3264,0	2124,2
0,5% - 18	1917,0	3497,1	2178,0	2619,6	4369,7	2848,5	3330,1	5308,4	3485,4	4238,6	6588,2	4187,2	4484,5	6946,1	4518,6	5887,3	8766,5	5712,0	1936,9	3590,1	2272,5
0,5% - 19	1986,1	2945,5	1867,0	2675,6	3769,8	2479,4	3470,3	4618,0	3112,5	4302,0	5497,6	3807,1	4594,6	5452,0	3808,8	6139,0	7305,6	5179,9	1966,8	3061,1	1988,6
0,5% - 20	2073,5	3144,3	2099,0	2813,5	3950,2	2800,5	3607,2	4820,9	3656,5	4533,2	5663,8	4567,2	4802,0	6838,8	5036,0	6323,0	7429,4	6704,0	2121,0	3271,9	2225,5
Média	1946,2	3316,5	1988,0	2636,7	4181,1	2631,1	3429,5	5044,0	3317,5	4289,4	5977,2	4055,3	4561,3	6290,3	4233,7	6036,4	7900,3	5602,2	1974,9	3426,0	2133,1
Desvio padrão	102,1	218,2	163,2	154,0	237,8	196,8	144,5	256,8	224,9	172,8	313,0	275,0	191,3	432,1	397,7	268,4	579,5	477,8	96,4	206,3	136,7

0,75%																		
Freq. (Hz)	1			2			4			8			10			30		
Medição	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
0,75% - 21	1932,9	2818,6	1821,3	2674,5	3611,6	2422,1	3525,5	4427,0	3058,2	4374,5	5288,6	3743,7	4603,1	5640,0	3946,8	6030,4	6936,4	5099,8
0,75% - 22	2145,2	3085,9	2212,1	2936,6	3885,0	2882,7	3812,0	4706,0	3586,9	4752,9	5518,1	4307,5	4838,0	5799,8	4589,8	6500,1	7188,3	5842,7
0,75% - 23	1990,3	2892,5	1834,0	2724,5	3634,0	2433,0	3578,0	4438,4	3137,7	4390,5	5179,6	3815,8	4354,9	5642,0	4096,0	6140,2	6724,6	5237,1
0,75% - 24	2667,7	3296,6	2030,6	3914,7	4159,2	2701,1	5529,8	5007,2	3455,8	12833,5	6007,4	4254,2	30577,6	6069,5	4496,8	53908,3	7407,9	5794,5
0,75% - 25	2006,4	3433,3	1974,6	2711,9	4242,0	2575,4	3494,0	5045,8	3184,4	4421,4	5862,9	3941,5	4573,5	6120,0	4396,3	6001,8	7431,2	5611,7
0,75% - 26	2332,3	3622,0	1657,9	3120,6	4532,6	2280,5	4045,2	5454,5	3010,4	5000,7	6355,7	3747,1	5325,3	6538,1	4029,9	6856,0	7976,4	5320,2
0,75% - 27	2197,4	3334,8	2380,0	3039,7	4217,0	3074,3	3900,0	5125,7	3808,3	4788,2	5997,4	4676,8	5179,7	6269,9	4824,6	6733,2	7686,0	6123,8
0,75% - 28	2130,2	3325,9	2085,0	2915,6	4179,6	2699,7	3663,0	5080,2	3383,6	4652,2	5846,0	4050,9	4937,8	6165,3	4354,8	6189,3	7548,8	5461,6
0,75% - 29	2160,1	2946,4	1851,5	2786,4	3713,7	2487,8	3624,3	4529,9	3209,2	4512,6	5299,7	3976,8	4877,5	5440,3	4234,9	6327,3	7168,6	5489,9
0,75% - 30	2027,0	3240,8	1828,9	2761,0	3980,5	2402,8	3571,6	4768,2	3057,5	4442,8	5579,0	3727,1	4770,0	5904,3	3923,7	6118,5	7136,6	5040,5
Média	2102,4	3188,9	1967,6	2852,3	3999,6	2595,9	3690,4	4841,7	3289,2	4592,9	5658,6	4024,1	4828,9	5946,6	4289,4	6321,9	7310,8	5502,2
Desvio padrão	117,4	254,8	203,9	148,5	298,5	232,1	177,1	335,1	249,0	205,7	365,0	292,6	284,4	333,1	281,8	291,7	365,8	328,6

1,00%																		
Freq. (Hz)	1			2			4			8			10			30		
Medição	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
1% - 31	1925,39	2212,61	2056,96	2631,27	3005,37	2692,36	3432,04	3842,48	3404,38	4286,71	4687,95	4108,27	4655,94	5001,32	4528,35	5924,16	6397,81	4205,51
1% - 32	1738,89	2716,36	1816,71	2409,00	3429,16	2399,85	3179,31	4210,87	3007,52	4036,30	5036,74	3685,95	4304,49	5296,60	3922,03	5718,04	6582,24	4990,29
1% - 33	2031,05	3204,51		2806,15	4093,21		3699,41	4940,08		4591,32	5873,48		4862,28	6248,52		6423,14	7575,15	
1% - 34	1826,90	2840,27		2517,45	3628,30		3325,09	4378,23		4163,34	5281,34		4441,81	5561,07		5917,98	6905,80	
1% - 35	1974,99	2993,86	2022,46	2724,51	3683,93	2645,66	3540,74	4433,56	3303,25	4441,68	5256,54	4035,27	4727,97	5436,48	4203,10	6144,33	8316,31	5396,46
1% - 36	1607,77	2539,76	1269,13	2319,05	3182,36	1736,66	2985,43	3833,56	2259,87	3675,92	4544,69	2783,75	4062,36	4741,16	2997,44	5362,91	7721,76	4048,74
1% - 37	1828,13	2713,60	1868,56	2526,24	3424,55	2452,22	3283,43	4201,17	3136,25	4110,48	5079,41	3717,73	4391,08	5461,74	3952,16	5820,46	6956,23	5012,75
1% - 38	1643,90	2043,10	1644,64	2279,67	2769,06	2220,40	3050,35	3509,06	2838,81	3898,33	4331,12	3487,19	4197,56	4572,60	3738,95	5790,85	5940,13	4818,94
1% - 39	1929,54	2751,54	1954,67	2673,95	3535,10	2587,40	3511,16	4366,31	3282,95	4422,60	5160,89	4002,53	4781,14	5379,56	4276,25	6249,96	6859,51	5692,68
1% - 40	1577,83	2234,70	1744,50	2198,51	2887,45	2310,49	2912,28	3631,28	2917,61	3675,48	4344,51	3563,82	3949,75	4576,83	3768,88	5323,14	5900,52	4852,36
Média	1808,44	2625,03	1797,20	2508,58	3363,85	2380,63	3291,92	4134,66	3018,83	4130,22	4959,67	3673,06	4437,44	5227,59	3923,39	5867,50	6759,90	4877,22
Desvio padrão	152,226	349,101	238,064	192,965	385,202	287,437	246,156	410,131	341,298	299,475	459,017	398,224	297,77	491,947	430,817	334,479	599,334	513,241

Ângulo de fase (°)

Sem cápsulas (Referência)																					
Freq. (Hz)	1			2			4			8			10			30			1		
Medição	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
SC1 SC2 SC3 SC4 SC5 SC6 SC7 SC8 SC9 SC10 SC41 SC42 SC43 SC44 SC45	44,5			36,6			29,5			23,2			20,4			9,3			40,4		
	42,8			38,0			29,4			22,8			22,3			11,5			41,7		
	44,4	31,3		39,1	26,8		33,7	21,9		27,2	18,2		24,6	14,7		14,6	9,3		45,9	30,7	
	43,8	33,5	37,3	36,3	26,9	31,2	30,6	23,9	25,8	24,2	19,0	19,9	22,3	18,5	18,5	11,8	8,0	8,9	44,4	33,1	36,0
	45,0	33,0	35,9	39,6	30,1	29,6	34,1	22,4	24,7	28,6	16,8	19,5	17,5	18,4	18,0	32,6	8,6	8,4	46,3	32,2	34,0
	46,1	28,2	34,4	39,8	26,9	29,0	32,4	23,1	24,1	19,1	17,9	18,5	12,1	11,6	18,3	34,6	10,5	8,7	45,0	31,7	33,4
	41,3	31,5	35,3	35,8	26,9	29,5	29,9	20,9	23,9	23,4	18,9	19,4	21,7	16,0	17,2	11,0	8,1	7,2	42,5	31,3	33,5
	42,4	31,0	35,4	36,2	26,2	29,5	30,6	21,6	23,7	24,2	16,6	19,9	22,6	14,9	15,4	11,4	7,4	6,0	42,2	29,9	34,1
	42,4	32,3	34,1	35,7	25,8	28,7	30,3	21,7	23,5	24,2	16,2	18,4	22,3	15,6	21,4	11,7	6,4	7,1	41,8	31,3	33,3
	44,7	32,4	34,2	38,3	26,7	29,1	32,2	22,3	23,9	26,0	18,2	19,0	23,3	16,4	13,6	13,1	8,4	7,6	43,4	30,8	33,4
	40,5	30,0	31,6	34,1	25,5	26,8	28,0	21,3	21,9	22,3	16,9	17,4	20,2	15,8	14,0	10,6	7,1	7,4	39,7	30,5	30,9
	42,3	27,1	31,3	35,8	23,3	26,4	29,8	19,9	23,4	24,5	15,9	16,1	22,3	14,1	14,1	12,9	6,7	9,0	41,7	27,5	29,6
	40,4	27,0	33,7	33,9	23,0	27,6	27,8	18,1	23,7	22,2	15,0	18,4	20,0	14,8	18,4	10,5	4,7	8,7	39,0	26,6	33,8
	41,6	28,2	32,3	35,1	24,5	27,7	28,6	20,2	23,6	22,5	16,0	18,1	20,5	14,8	12,5	10,3	2,1	8,1	40,9	28,5	32,2
	40,7	26,2	31,3	33,9	22,0	27,2	28,1	18,3	22,1	16,5	14,1	17,4	20,5	15,8	15,0	8,5	1,5	6,7	39,9	25,3	30,9
Média	42,9	30,1	33,9	36,5	25,7	28,5	30,3	21,2	23,7	23,4	16,9	18,5	21,5	15,5	16,4	11,3	6,8	7,8	42,3	30,0	32,9
Desvio padrão	1,7	2,4	1,9	1,9	2,1	1,3	1,9	1,6	1,0	2,8	1,4	1,1	2,8	1,7	2,6	1,6	2,5	0,9	2,2	2,2	1,7

0,50%																					
Freq. (Hz)	1			2			4			8			10			30			1		
Medição	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
0,5% - 11	45,7	30,5	36,7	38,6	25,1	31,3	33,1	21,3	26,5	26,6	16,8	20,9	24,8	15,0	17,5	15,2	7,7	10,1	43,8	29,9	35,9
0,5% - 12	43,3	30,0	39,7	37,5	25,2	32,4	30,9	20,6	27,3	25,0	16,0	22,7	23,1	14,0	25,4	11,9	5,7	12,1	43,1	30,2	45,3
0,5% - 13	44,2	31,2	37,0	37,3	26,3	31,8	32,3	22,1	26,0	25,6	18,0	20,9	24,1	15,4	19,0	12,6	28,7	10,1	43,2	30,5	35,9
0,5% - 14	43,3	34,0	37,4	37,1	26,9	31,1	31,1	23,3	25,8	24,6	18,1	21,2	22,3	16,2	22,3	12,3	6,6	11,0	42,3	32,3	35,6
0,5% - 15	44,0	29,9	36,3	37,6	24,9	31,3	31,5	20,0	25,9	25,1	15,4	20,2	23,2	14,5	20,4	12,3	6,2	9,1	44,0	29,1	35,0
0,5% - 16	43,7	31,5	38,3	37,7	25,9	33,6	31,8	22,0	28,0	25,5	18,1	23,4	22,3	15,7	20,1	12,2	7,6	12,2	43,9	30,9	36,8
0,5% - 17	42,7	30,4	36,5	36,6	26,6	30,9	30,8	21,4	26,2	24,6	17,0	20,9	22,6	14,8	15,3	12,6	7,6	9,9	42,7	30,1	35,4
0,5% - 18	44,2	31,1	34,6	37,7	27,9	29,3	31,7	23,8	24,4	25,9	21,3	19,5	23,8	27,3	21,0	13,7	11,7	8,8	43,7	30,5	34,0
0,5% - 19	42,6	34,3	37,0	36,7	28,5	31,4	31,0	23,6	27,0	25,0	19,4	21,2	22,7	20,3	18,9	12,2	9,6	9,9	42,9	33,1	36,2
0,5% - 20	43,5	30,2	40,1	37,7	25,5	34,8	32,1	22,1	30,2	26,0	17,8	26,5	23,7	21,8	29,0	13,1	9,1	17,3	43,2	30,9	38,8
Média	43,7	31,3	37,3	37,4	26,3	31,8	31,6	22,0	26,7	25,4	17,8	21,7	23,3	17,5	20,9	12,8	8,0	11,0	43,3	30,8	36,9
Desvio padrão	0,9	1,5	1,6	0,5	1,2	1,4	0,7	1,2	1,5	0,6	1,6	1,9	0,8	4,1	3,7	0,9	1,8	2,3	0,5	1,1	3,1

0,75%																					
Freq. (Hz)	1			2			4			8			10			30			1		
Medição	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
0,75% - 21	43,2	32,2	37,6	35,8	27,6	31,7	30,3	22,0	26,9	24,6	18,1	21,0	21,4	16,2	19,3	11,0	8,8	10,2	41,3	32,1	36,7
0,75% - 22	42,6	29,7	35,6	35,2	25,2	29,8	29,7	21,5	25,1	23,3	17,1	19,9	20,3	16,6	18,1	9,3	7,5	9,0	40,5	30,4	34,6
0,75% - 23	42,8	31,5	38,7	36,0	27,3	33,2	28,4	22,4	27,5	23,8	17,1	20,6	22,8	17,3	20,1	12,3	6,4	10,6	41,6	32,0	37,5
0,75% - 24	58,7	30,8	38,3	53,7	25,4	33,2	47,4	22,1	27,1	48,3	17,4	22,3	35,4	15,9	20,3	35,6	8,4	10,8	61,0	30,4	37,5
0,75% - 25	40,9	28,7	35,9	34,2	24,4	30,8	28,4	20,1	27,2	21,8	15,7	24,0	21,2	14,0	22,4	10,9	6,5	10,8	41,2	29,0	35,2
0,75% - 26	42,1	29,4	40,5	32,5	23,8	34,5	29,2	20,6	28,8	21,9	16,1	22,3	20,6	13,9	20,6	10,5	7,2	10,4	41,5	30,1	38,1
0,75% - 27	42,4	30,9	35,2	35,3	26,0	29,9	29,7	21,4	24,7	22,6	17,0	23,2	22,3	15,4	17,5	10,5	6,4	9,2	42,2	30,4	34,4
0,75% - 28	41,5	30,3	35,4	36,1	25,4	30,3	29,4	21,6	23,9	23,3	16,4	20,9	20,6	15,2	18,2	10,6	7,3	9,0	40,0	29,4	34,8
0,75% - 29	41,2	30,7	38,4	35,1	26,3	33,8	29,3	22,0	27,4	22,7	17,0	22,5	22,0	14,7	20,7	11,9	9,0	11,5	41,4	30,5	37,3
0,75% - 30	42,8	28,2	36,9	35,4	24,3	31,1	30,8	20,5	26,4	23,6	16,2	21,0	23,6	15,8	19,0	11,3	7,0	10,0	42,2	29,0	36,1
Média	42,2	30,2	37,2	35,1	25,6	31,8	29,5	21,3	26,5	23,1	16,7	21,8	21,7	15,5	19,6	10,9	7,3	10,2	41,3	30,3	36,2
Desvio padrão	0,8	1,2	1,7	1,0	1,3	1,6	0,7	0,7	1,4	0,8	0,7	1,2	1,1	1,1	1,4	0,8	0,9	0,8	0,7	1,1	1,3

1,00%																					
Freq. (Hz)	1			2			4			8			10			30			1		
Medição	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
1% - 31	42,5	38,4	37,1	37,1	32,5	31,9	30,2	26,9	26,5	24,5	21,6	23,5	23,4	19,6	20,3	12,1	11,1	18,9	42,2	36,6	36,3
1% - 32	44,1	32,7	37,4	37,7	27,9	31,8	31,6	22,4	26,9	25,5	19,1	22,0	22,2	16,5	20,2	10,7	8,2	11,0	42,8	33,3	36,6
1% - 33	43,0	31,9		35,9	26,5		28,6	22,0		22,7	18,0		21,4	15,2		10,8	7,1		40,9	31,2	
1% - 34	45,0	33,2		37,1	28,0		31,1	21,6		24,3	17,7		23,3	16,8		12,2	8,3		42,7	33,2	
1% - 35	42,8	28,6	35,8	36,0	25,0	30,0	30,3	21,1	25,6	23,9	16,8	20,9	21,9	15,5	18,6	12,3	62,6	10,2	41,4	29,1	34,8
1% - 36	44,9	29,2	40,0	35,7	24,7	34,2	31,1	21,3	28,7	24,2	19,0	24,1	22,8	18,3	23,1	13,7	7,1	11,5	42,8	30,7	37,8
1% - 37	43,7	31,5	36,5	36,9	26,9	31,1	31,3	22,9	25,5	24,6	18,7	20,3	22,8	16,7	18,2	13,0	8,4	9,8	42,4	31,6	35,5
1% - 38	45,3	37,9	38,5	39,3	31,4	33,0	32,9	26,5	27,6	27,3	20,9	22,2	25,9	19,5	19,8	15,0	10,2	11,9	43,8	35,4	36,7
1% - 39	43,3	33,3	37,0	37,1	28,6	31,2	30,9	23,1	26,2	25,1	18,4	20,9	23,3	16,4	19,5	14,4	6,6	11,1	42,5	31,9	35,2
1% - 40	44,1	33,6	36,5	38,1	28,6	31,3	32,0	24,2	26,1	26,0	19,4	20,5	24,1	17,7	18,6	13,9	8,6	10,3	43,1	33,1	35,6
Média	43,9	33,0	37,4	37,1	28,0	31,8	31,0	23,2	26,6	24,8	19,0	21,8	23,1	17,2	19,8	12,8	8,4	11,8	42,5	32,6	36,1
Desvio padrão	0,9	3,0	1,2	1,0	2,4	1,2	1,1	2,0	1,0	1,2	1,4	1,3	1,2	1,4	1,4	1,4	1,4	2,8	0,8	2,1	0,9